

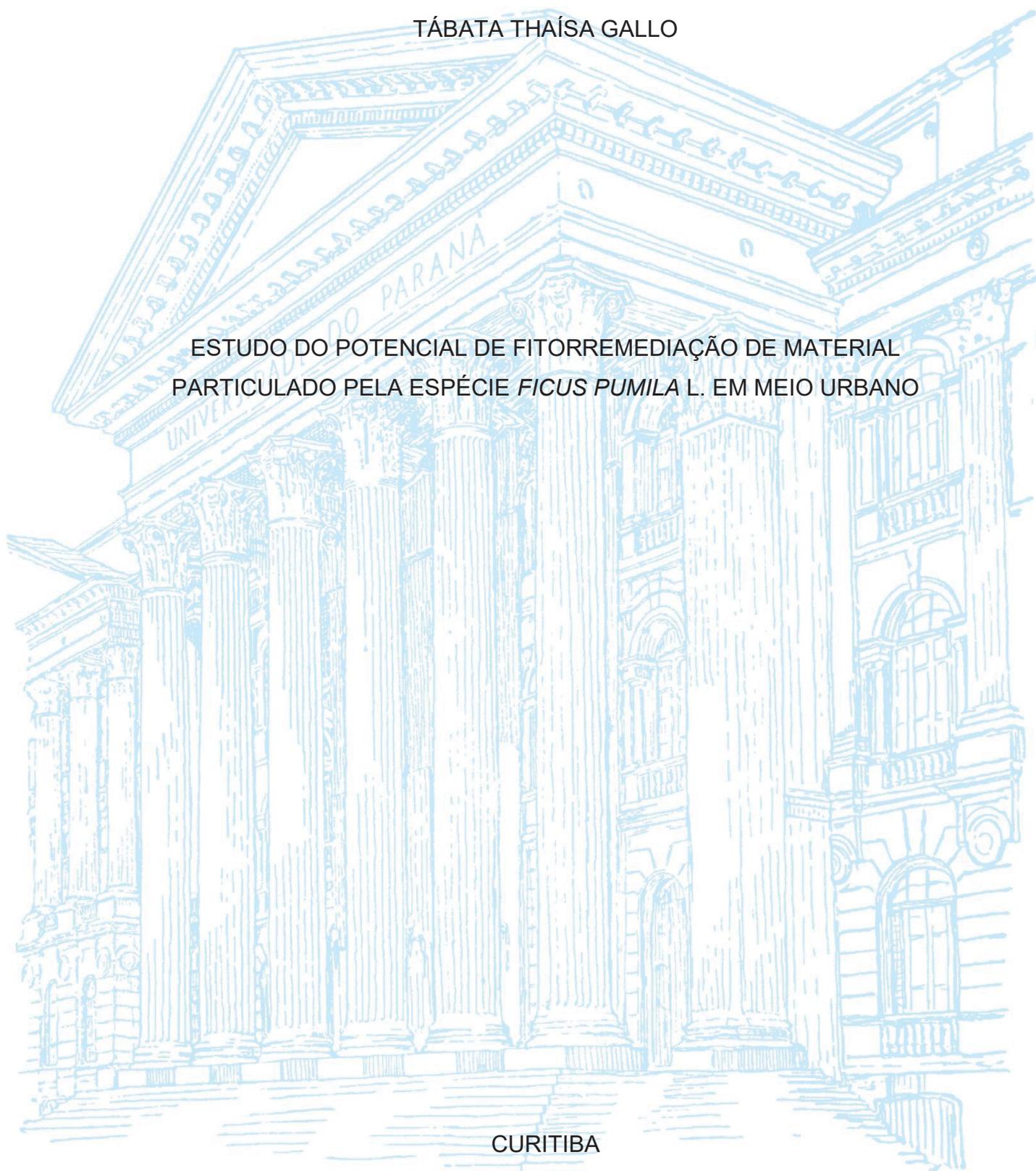
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TÁBATA THAÍSA GALLO

ESTUDO DO POTENCIAL DE FITORREMEDIAÇÃO DE MATERIAL
PARTICULADO PELA ESPÉCIE *FICUS PUMILA* L. EM MEIO URBANO

CURITIBA

2022



TÁBATA THAÍSA GALLO

ESTUDO DO POTENCIAL DE FITORREMEDIAÇÃO DE MATERIAL
PARTICULADO PELA ESPÉCIE *FICUS PUMILA* L. EM MEIO URBANO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Engenharia Química, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Mônica Beatriz Kolicheski.

Coorientadora: Prof^a. M.Sc. Sandra Mara Pereira de Queiroz.

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Gallo, Tábata Thaísa

Estudo do potencial de fitorremediação de material particulado pela espécie *Ficus pumila* L. em meio urbano. / Tábata Thaísa Gallo. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Beatriz Kolicheski.

Coorientadora: Profa. M.Sc. Sandra Mara Pereira de Queiroz.

1. Meio ambiente. 2. Poluição – Aspectos ambientais. 3. Poluentes. 4. Curitiba (PR) – Aspectos ambientais. I. Kolicheski, Mônica Beatriz. II. Queiroz, Sandra Mara Pereira de. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial. IV. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB-9/1797



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE
URBANO E INDUSTRIAL - 40001016057P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **TABATA THAISA GALLO** intitulada: **Estudo do potencial de fitorremediação de material particulado pela espécie *Ficus pumila* L. em meio urbano**, sob orientação da Profa. Dra. MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Março de 2022.

Assinatura Eletrônica
22/03/2022 11:51:12.0
MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
24/03/2022 09:01:08.0
JULIANA SCHULTZ
Avaliador Externo (55002268)

Assinatura Eletrônica
22/03/2022 11:33:32.0
TIARO KATU PEREIRA
Avaliador Externo (CONSULTORIA ENGEMIN)

Assinatura Eletrônica
29/03/2022 14:43:46.0
SANDRA MARA PEREIRA DE QUEIROZ
Coorientador(a) (LQ GEOAMBIENTAL)

Dedico este trabalho a todas as pessoas que,
apesar das circunstâncias, não desistem
de fazer ciência neste país.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha orientadora Mônica que prontamente me aceitou como orientanda desde o primeiro contato via e-mail. Sou grata por todo o seu empenho em viabilizar o estudo, não apenas por meio da orientação, mas também providenciando os materiais necessários, por estar disponível até mesmo nos finais de semana, respondendo minhas mensagens, enquanto eu estava em laboratório. Pela paciência comigo, uma vez que o tema deste trabalho era algo novo, com o qual eu nunca tinha trabalhado, e, principalmente, pelo acolhimento nos momentos difíceis enfrentados não apenas no âmbito do trabalho, mas na minha vida pessoal também.

Agradeço à professora Sandra, minha coorientadora, por todas as contribuições, pelo carinho, por ter se disposto a participar de tantas reuniões e pela leveza que tantas vezes foi necessária. Agradeço a Bia e todos os outros membros do projeto “O ar que respiramos” que contribuíram de alguma forma com este trabalho. Agradeço ao professor Edmilson pela contribuição na identificação das espécies.

Agradeço a minha amiga e *roommate* Fabíola pela imensa ajuda. Sou grata por todas as caronas, por todas as ajudas durante a coleta (por todas as vezes que você segurou o plástico para eu colocar as amostras dentro, por fazer simpatia colocando o ovo na sacada para parar de chover e eu poder finalmente fazer coleta), pelas conversas que me fizeram ter ideias sobre o trabalho, por me ouvir reclamar e por muitas coisas que eu tenho certeza de que estou esquecendo. À Tyaki pelos mapas que fez e por todo o apoio. Ao Danilo pelas ajudas com as planilhas, pelos dias que sentou na mesma mesa que eu, enquanto eu me debruçava sobre o trabalho e por todo o apoio. À Isabela e a Débora que, provavelmente, cansaram de receber áudios meus com dúvidas e pedidos de opinião sobre os mais diversos temas, mas que sempre responderam com paciência e dedicação.

Agradeço imensamente a todas as pessoas que doaram dinheiro e/ou compartilharam a *vakinha online* que fizemos, é por conta dela que pudemos comprar os materiais necessários e viabilizar a continuidade e conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos que estiveram comigo ao longo destes últimos anos, por todo o apoio mesmo que de forma virtual. E por último, mas não menos importante, agradeço a todos os artistas, cuja arte me serviu de conforto e motivação nesse período de tempo recheado de medo e incertezas.

*"It's alright to not have a dream
If you have moments where you feel happiness for a while."*

Min Yoongi

RESUMO

Atividades antrópicas vêm sendo responsabilizadas pelo aumento da degradação ambiental, sendo um dos impactos destas atividades a poluição atmosférica, esta é considerada uma grande ameaça à qualidade de vida e à saúde, principalmente daqueles que vivem em regiões com maior densidade urbana. Dado a sua gravidade, o assunto vem sendo estudado, procurando se entender melhor a geração dos poluentes, emissão, interação entre eles na atmosfera, formas de controle e minimização. Entre os poluentes nocivos à saúde, está o material particulado (MP), que consiste em partículas com diâmetro inferior a 100 μm , que ficam suspensas no ar e podem ser inaladas. As mais prejudiciais à saúde humana são aquelas com diâmetros abaixo de 2,5 μm (MP_{2,5}), que já foram relacionadas a um aumento no risco de complicações cardiopulmonares com mortalidade. Uma das formas de minimizar este poluente pode ser por meio da fitorremediação, que consiste na utilização de plantas para remediação da poluição. Nesta, o MP se depõe sobre a superfície das folhas das plantas e após estas serem lavadas pela chuva o poluente carregado pela água não sofre ressuspensão. Após a chuva, a folha está limpa e tem condição de reter novamente mais partículas do poluente. Além de árvores, que possuem uma grande área foliar, paredes verdes podem ser uma opção eficaz que superam a maioria das barreiras impostas pelo meio urbano, como o uso de espaço pela planta e condições do solo. O trabalho analisou a retenção de MP pela espécie *Ficus pumila* L., cultivada em uma parede verde exposta diariamente à poluição gerada por veículos na cidade de Curitiba. Foram coletadas amostras de folhas e analisadas em laboratório. A metodologia de quantificação consistiu em agitar manualmente as amostras de folhas em água destilada por 1 min e clorofórmio por 40 s, para o sMP e wMP, respectivamente, e filtragem da suspensão. Posteriormente, a quantidade de MP e cera epicuticular presente na amostra foi determinada por gravimetria. Para a comparação da quantidade de MP retido para a espécie foi observado a maior retenção de MP na cera epicuticular do que de forma superficial nas folhas para as mesmas amostras. Os dados obtidos mostraram que a cinética de fitorremediação seguiu um modelo de ordem zero e não foi possível determinar o ponto de saturação de MP por esta espécie. Ao se analisar três estações diferentes, outono, inverno e primavera, foram obtidos maiores valores de MP retido nas folhas para o inverno, estação que apresentou níveis mais altos de concentração de MP no ar. Para diferentes alturas em relação ao solo foi possível verificar que quanto mais próximo do solo mais MP foi retido pela planta. Os resultados mostraram que a espécie *Ficus pumila* L. apresentou potencial para a fitorremediação do MP na área de estudo.

Palavras-chave: Poluição atmosférica. Remediação. Dispersão de poluentes. Paredes verdes.

ABSTRACT

Anthropogenic activities have been blamed for the increase in environmental degradation, one of the impacts of these activities being air pollution, which is considered a major threat to the quality of life and health, especially for those who live in regions with greater urban density. Given its seriousness, the subject has been studied, seeking to better understand the generation of pollutants, the emissions, interaction between them in the atmosphere, forms of control and minimization. Among the pollutants harmful to health is particulate matter (PM), which consists of particles with a diameter below 100 μm that are suspended in the air and can be inhaled. The most harmful to human health are those with diameters below 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) which have already been linked to an increased risk of cardiopulmonary complications with mortality. One of the ways to minimize this pollutant can be through phytoremediation, which consists of using plants to remediate pollution. In this technique, the PM is deposited on the surface of the leaves of the plants and after these are washed by the rain, the pollutant carried by the water does not suffer resuspension. After the rain, the leaves are clean and able to retain more pollutant particles again. In addition to trees that have a large leaf area, green walls can be an effective option that overcomes most barriers imposed by the urban environment, such as the plant's use of space and soil conditions. This present work analyzed the retention of PM by the species *Ficus pumila* L. cultivated in a wall exposed daily to pollution generated by vehicles in the city of Curitiba. Leaf samples were collected and analyzed in the laboratory. The quantification methodology consisted of manually shaking the leaf samples in distilled water for 1 min and chloroform for 40 s, for $s\text{MP}$ and $w\text{MP}$, respectively, and filtering the suspension. Subsequently, the amount of PM and epicuticular wax in the sample was determined by gravimetry. It was observed higher retention of PM in the epicuticular wax than in the leaves surface for the same samples. The data obtained showed that the phytoremediation kinetics followed a zero-order model and it was not possible to determine the PM saturation point for this species. When analyzing three different seasons, autumn, winter and spring, higher values of PM retained in leaves were obtained for the winter season, which showed higher levels of PM concentration in the air. For different heights in relation to the ground, it was possible to verify that the closer to the ground the more PM was retained by the plant. The results showed that the *Ficus pumila* L. showed potential for PM phytoremediation in the study area.

Keywords: Atmospheric pollution. Remediation. Dispersion of pollutants. Green walls.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - DEMONSTRAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA PARTÍCULA NO SISTEMA RESPIRATÓRIO EM FUNÇÃO DO SEU TAMANHO..... | 27 |
| FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA. | 41 |
| FIGURA 3 - IMAGEM ILUSTRATIVA DO PECÍOLO. | 43 |
| FIGURA 4 - RESULTADO FORNECIDO PELO SOFTWARE IMAGEJ PARA O CÁLCULO DA ÁREA FOLIAR..... | 44 |
| FIGURA 5 - METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DO sMP | 45 |
| FIGURA 6 - METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DO wMP | 47 |
| FIGURA 7 - MÉDIAS DAS TEMPERATURAS MÍNIMAS E MÁXIMAS EM CURITIBA PARA OS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020..... | 55 |
| FIGURA 8 - MÉDIAS DOS VALORES DE UMIDADE RELATIVA EM CURITIBA PARA OS MESES NOS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020. | 57 |
| FIGURA 9 - MÉDIAS DOS VALORES DE UMIDADE RELATIVA EM CURITIBA PARA AS ESTAÇÕES DO ANO NOS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020. | 57 |
| FIGURA 10 - MÉDIAS DOS VALORES DE PRECIPITAÇÃO EM CURITIBA PARA OS MESES NOS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020. | 58 |
| FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DA AVENIDA PARANÁ NO MUNICÍPIO DE CURITIBA. | 60 |
| FIGURA 12 - FLUXOS DE TRÁFEGO NA AVENIDA PARANÁ. | 61 |
| FIGURA 13 - FICUS PUMILA L. E PODOCARPUS MACROPHYLLUS, PLANTADAS NO PONTO DE COLETA P1..... | 64 |
| FIGURA 14 - VISTA DO PONTO DE COLETA P1 E DA AVENIDA PARANÁ..... | 65 |
| FIGURA 15 - PONTO DE COLETA P1. | 65 |
| FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE COLETA P1, TERMINAIS CABRAL E BOA VISTA E DA ESTAÇÃO DE MEDIDA BOA VISTA E MERCÊS..... | 69 |
| FIGURA 17 - FOLHAS DAS AMOSTRAS DISPOSTAS SOBRE A BANCADA. | 70 |
| FIGURA 18 - MASSA DE MP RETIDA PARA CADA FRAÇÃO NA CERA E SUPERFICIALMENTE. | 81 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 19 - RELAÇÃO ENTRE O $sMP_{2,5}$ PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h) PARA A FRAÇÃO DE 0,45 A 2,5 μm | 86 |
| FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE O sMP_8 PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h) PARA A FRAÇÃO DE 2,5 A 8 μm | 87 |
| FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE O sMP_{53} PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h) PARA A FRAÇÃO DE 8 A 53 μm | 87 |
| FIGURA 22 - RELAÇÃO ENTRE O sMP_{total} PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h). | 88 |
| FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO COM OS OBTIDOS POR HE, QIU E POTT (2019) PARA DUAS FAIXAS DE ALTURA DA PAREDE VERDE. | 97 |
| FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DO sMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA O EXPERIMENTO DE ANÁLISE COMPLETA PARA AS MESMAS AMOSTRAS. | 99 |
| FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DO sMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA OS EXPERIMENTOS DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO. | 100 |
| FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO DO sMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA CADA ESTAÇÃO. | 102 |
| FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DO sMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA CADA FAIXA DE ALTURA. | 103 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| QUADRO 1 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ADEQUADA..... | 47 |
| QUADRO 2 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE AGITAÇÃO. | 48 |
| QUADRO 3 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE AGITAÇÃO MANUAL. | 48 |
| QUADRO 4 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE ESTABELECIMENTO DA MELHOR TÉCNICA DE FILTRAÇÃO. | 49 |
| QUADRO 5 - MEIO FILTRANTES UTILIZADOS NO ENSAIO DE ESTABELECIMENTO DA MELHOR TÉCNICA DE FILTRAÇÃO..... | 49 |
| QUADRO 6 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE SELEÇÃO DO SOLVENTE ORGÂNICO A SER UTILIZADO. | 50 |
| QUADRO 7 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE QUANTIFICAÇÃO DE CERA..... | 51 |
| QUADRO 8 - DADOS SOBRE O ENSAIO DA FITORREMEDIAÇÃO DE MP PELA ESPÉCIE SELECIONADA. | 52 |
| QUADRO 9 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO. | 52 |
| QUADRO 10 - DADOS SOBRE O ENSAIO EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO. | 53 |
| QUADRO 11 - DADOS SOBRE O ENSAIO EM DIFERENTES FAIXAS DE ALTURA DA PAREDE VERDE. | 54 |
| QUADRO 12 - RUAS E AVENIDAS CONSIDERADAS PARA ESCOLHA DO SÍTIO DE ESTUDO..... | 59 |
| QUADRO 13 - IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES E POSSÍVEIS PONTOS PARA COLETA DE AMOSTRAS NA AVENIDA PARANÁ..... | 62 |
| QUADRO 14 - INFORMAÇÕES SOBRE A ESTAÇÃO BOA VISTA E ESTAÇÃO MERCÊS..... | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - CUSTO ECONÔMICOS GERADOS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA. | 25 |
| TABELA 2 - CUSTOS ECONÔMICOS GERADOS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA..... | 28 |
| TABELA 3 - MÉDIA HORÁRIA DE AUTOMÓVEIS E ÔNIBUS NA AVENIDA PARANÁ..... | 60 |
| TABELA 4 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE VELOCIDADE..... | 71 |
| TABELA 5 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE TEMPO DE AGITAÇÃO... | 72 |
| TABELA 6 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE COMPARAÇÃO ENTRE AGITAÇÃO MECÂNICA E MANUAL..... | 74 |
| TABELA 7 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE DETERMINAÇÃO DA METODOLOGIA DE FILTRAÇÃO..... | 75 |
| TABELA 8 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE SELEÇÃO DO SOLVENTE. . | 77 |
| TABELA 9 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DA CERA EPICUTICULAR..... | 78 |
| TABELA 10 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO COMPLETA DA FITORREMEDIAÇÃO DE MP PELA ESPÉCIE <i>FICUS PUMILA</i> L. ... | 80 |
| TABELA 11 - VALORES TOTAIS DE MASSA DE MP RETIDO POR FRAÇÃO E TIPO DE DEPOSIÇÃO..... | 81 |
| TABELA 12 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR PRZYBYSZ, NERSISYAN E GAWROŃSKI (2019) E POR ESTE TRABALHO..... | 83 |
| TABELA 13 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO. | 85 |
| TABELA 14 - QUANTIDADE MÉDIA DE MP PRESENTE NA FOLHA, DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE MP NO AR E DADOS METEOROLÓGICOS. | 89 |
| TABELA 15 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA AS ESTAÇÕES DE OUTONO, INVERNO E PRIMAVERA..... | 91 |
| TABELA 16 - RESULTADOS DE MASSA DE MP OBTIDOS PARA AS FRAÇÕES MENORES, CONCENTRAÇÃO DE MP NO AR, UMIDADE E TEMPERATURA MÉDIAS PARA AS ESTAÇÕES DO ANO..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 17 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE COMPARAÇÃO DE DIFERENTES FAIXAS DE ALTURA..... | 95 |
| TABELA 18 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA EXPERIMENTO DE ANÁLISE COMPLETA. | 98 |
| TABELA 19 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA O EXPERIMENTO DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO. | 99 |
| TABELA 20 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA O EXPERIMENTO DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO. | 101 |
| TABELA 21 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA EXPERIMENTO DE FAIXAS DE ALTURA DA PAREDE VERDE. | 103 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| BC | - <i>Black Carbon</i> |
| CEMADEN | - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres |
| CO | - Monóxido de Carbono |
| CO ₂ | - Dióxido de Carbono |
| CONAMA | - Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| Cnumad | - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento |
| CREA | - <i>Center for Research on Energy and Clean Air</i> |
| DNT | - Doenças não transmissíveis |
| EMASP | - <i>Energy Sector Management Assistance Program</i> |
| EUA | - Estados Unidos da América |
| GHDx | - <i>Global Health Data Exchange</i> |
| HPA | - Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos |
| IBGE | - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMET | - Instituto Nacional de Meteorologia |
| IPEA | - Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada |
| IPUCC | - Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba |
| LACTEA | - Laboratório de Computação e Tecnologia em Engenharia Ambiental |
| LCPQ | - Laboratório de Catálise e Processos Químicos |
| MP | - Material Particulado |
| sMP | - Material Particulado Superficial |
| wMP | - Material Particulado presente na cera epicuticular |
| NO _x | - Óxidos de Nitrogênio |
| NO | - Óxido Nítrico |
| NO ₂ | - Dióxido de Nitrogênio |
| O ₃ | - Ozônio |
| ONU | - Organização das Nações Unidas |
| PIB | - Produto Interno Bruto |
| PROCONVE | - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores |
| PROMOT | - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares |
| PRONAR | - Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar |

| | |
|-----------------|--|
| SARS | - <i>Severe Acute Respiratory Syndrome</i> |
| SIMEPAR | - Sistema Meteorológico do Paraná |
| SO _x | - Óxidos de Enxofre |
| O ₂ | - Oxigênio |
| UFPR | - Universidade Federal do Paraná |
| VOCs | - Compostos Orgânicos Voláteis |
| WHO | - <i>World Health Organization</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 2 OBJETIVOS | 21 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 21 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 21 |
| 3 REVISAO DA LITERATURA | 22 |
| 3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA | 22 |
| 3.1.1 Material particulado e seus efeitos na saúde | 25 |
| 3.1.2 Legislação | 29 |
| 3.2 REMEDIAÇÃO | 31 |
| 3.2.1 Biorremediação | 31 |
| 3.2.2 Fitorremediação | 33 |
| 3.2.2.1 <i>Fatores que influenciam a fitorremediação</i> | 34 |
| 3.3 PAREDES VERDES | 38 |
| 4 METODOLOGIA | 41 |
| 4.1 ÁREA DE ESTUDO | 41 |
| 4.1.1 Escolha do sítio de estudo e das espécies | 42 |
| 4.2 DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE MP | 43 |
| 4.3 COLETA E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS | 43 |
| 4.4 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DE MP | 44 |
| 4.4.1 Material Particulado Superficial (sMP)..... | 45 |
| 4.4.2 Material Particulado presente na cera (wMP) | 46 |
| 4.4.3 Estabelecimento da metodologia de quantificação de MP fitorremediado | 47 |
| 4.4.3.1 <i>Determinação da velocidade adequada e tempo ótimo de agitação</i> | 47 |
| 4.4.3.2 <i>Estabelecimento da melhor técnica de filtração</i> | 49 |
| 4.4.3.3 <i>Seleção do solvente para obtenção do wMP</i> | 50 |
| 4.4.4 Avaliação da Fitorremediação de MP pela espécie <i>Ficus pumila L.</i> | 51 |
| 4.4.4.1 <i>Quantificação da cera epicuticular</i> | 51 |
| 4.4.4.2 <i>Análise completa para as mesmas amostras</i> | 51 |
| 4.4.4.3 <i>Cinética de fitorremediação de MP</i> | 51 |
| 4.4.4.4 <i>Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes estações do ano</i> | 53 |
| 4.4.4.5 <i>Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes faixas de altura</i> | 53 |

| | |
|---|------------|
| 5 RESULTADOS | 55 |
| 5.1 CARACTERÍSTICA CLIMÁTICAS ÁREA DE ESTUDO..... | 55 |
| 5.1.1 Sitio de estudo | 58 |
| 5.1.1.1 Tráfego da Avenida Paraná..... | 60 |
| 5.1.2 Espécies e pontos de coleta avaliados..... | 61 |
| 5.1.2.1 Espécies presentes na parede verde..... | 66 |
| 5.1.2.2 Identificação das estações de monitoramento | 67 |
| 5.2 DETERMINAÇÃO DA METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DE MP FITORREMEIADO..... | 69 |
| 5.2.1 Determinação da velocidade adequada e tempo ótimo de agitação | 71 |
| 5.2.2 Estabelecimento da melhor técnica de filtração | 73 |
| 5.2.3 Seleção do solvente | 76 |
| 5.3 AVALIAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO DE MP PELA ESPÉCIE <i>FICUS PUMILA</i> L..... | 78 |
| 5.3.1 Quantificação da cera epicuticular da espécie <i>Ficus pumila</i> L..... | 78 |
| 5.3.2 Análise completa para as mesmas amostras | 79 |
| 5.3.3 Cinética de fitorremediação..... | 84 |
| 5.3.4 Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes estações do ano..... | 90 |
| 5.3.5 Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes faixas de altura | 94 |
| 5.3.6 Eficácia da fitorremediação do MP pela <i>Ficus pumila</i> L..... | 98 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 104 |
| SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS..... | 105 |
| REFERÊNCIAS | 106 |
| ANEXO I – DADOS DE PRECIPITAÇÃO..... | 115 |
| APÊNDICE 1 | 121 |

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos principais problemas ambientais da atualidade, inúmeras atividades humanas geram uma variedade de poluentes que impõem riscos à saúde humana, dentre os principais, destaca-se o material particulado (MP). Este pode ser gerado por fontes antropogênicas, como emissão veicular, atividades industriais e domésticas, entre outros; mas também possui fontes naturais, como tempestades de areia e aerossóis marinhos (PACE et al., 2021).

O MP impõe ameaças à saúde humana e já foi apontado como causa de doenças como câncer de pulmão, condições cardiovasculares e respiratórias, como bronquite crônica, por exemplo, além de mortes prematuras (ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM (EMASP), 2011). O MP é composto de partículas orgânicas ou inorgânicas que podem ser sólidas ou líquidas, cujo diâmetro aerodinâmico varia de 0,001 a 100 μm (PRZYBYSZ et al., 2020). As partículas de diâmetro menores que 2,5 μm são as que trazem mais riscos (WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2005), pois quanto menor o diâmetro da partícula mais longe ela é capaz de penetrar no trato respiratório (HOFMANN, 2011). Além da deterioração da qualidade de vida e problemas de saúde gerados pela poluição do ar, decorrem também impactos econômicos para a sociedade como um todo, pois indivíduos adoecidos faltam em seus trabalhos e buscam atendimento médico, acarretando mais custos para o sistema de saúde (CENTER FOR RESEARCH ON ENERGY AND CLEAN AIR (CREA), 2020).

Uma estratégia econômica de redução da concentração de poluentes no ar, como o MP, é o aumento da cobertura vegetal de um local (ZHANG et al., 2020). O potencial da vegetação como um purificador natural do ar tem se tornado tema de pesquisas recentemente, pois esta é capaz de atenuar a concentração de poluentes atmosféricos, como o MP, por meio do processo de fitorremediação.

O MP presente no ar se deposita sobre as folhas das plantas, uma parcela fica retida apenas superficialmente e outra é retida na cera epicuticular presente nestas folhas, estas duas parcelas de MP denominam-se sMP e wMP, respectivamente (YUE et al., 2021). O sMP é fração de MP que pode ser carregado pela água da chuva e posteriormente é decomposto no solo, dessa forma, após a chuva a planta está disponível para reter mais poluente, realizando novamente o processo de fitorremediação (DZIERŻANOWSKI et al., 2011). A quantidade de MP que é retido

pelas folhas das plantas depende de vários fatores, como a concentração do poluente no ar do local, condições meteorológicas, como umidade e temperatura, e características morfológicas e microestruturais da planta (WANG et al., 2015; POPEK et al., 2018; ZHANG et al., 2019).

Pensando em contextos urbanos, paredes verdes (também chamadas de muros verdes) mostram-se como uma boa ferramenta de auxílio no combate à poluição atmosférica (HE; QIU; POTT, 2019), pois estas requerem pouco espaço para serem cultivadas. Tendo em vista todas as variáveis que podem influenciar no processo de retenção do poluente pela planta e as diferentes características de cada localidade, é importante que espécies sejam estudadas individualmente. Sendo assim, a *Ficus pumila* L., popularmente conhecida como unha-de-gato, foi escolhida para ser utilizada nesse estudo, pois é uma espécie adaptada às condições climáticas de Curitiba - PR e comumente utilizadas em muros e fachadas na cidade. Este trabalho analisou o potencial de fitorremediação do MP pela espécie *Ficus pumila* L., cultivada em uma parede verde localizada na Avenida Paraná, na cidade de Curitiba - PR.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Quantificar a remoção de material particulado (MP) por fitorremediação em uma parede verde, na cidade de Curitiba - PR.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar espécies de plantas que possuam características adequadas de plantio na cidade de Curitiba - PR, dando preferência a espécies que sejam utilizadas em paredes verdes ou de forma ornamental;
- b) Escolher locais para desenvolver o estudo em meio urbano, com altas concentrações de MP no ar e trânsito intenso;
- c) Determinar a metodologia a ser adotada para quantificação do MP;
- d) Determinar a quantidade (μgcm^{-2} de área foliar) de MP retido nas folhas das espécies de plantas selecionadas.

3 REVISAO DA LITERATURA

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A industrialização e o crescimento populacional ocorridos nas últimas décadas aumentaram a preocupação com prejuízos ambientais e de saúde resultantes de atividades antrópicas (MONTE; ALBUQUERQUE; REISEN, 2017). De fato, atividades humanas vêm sendo associadas a um progressivo aumento da degradação do meio ambiente (MAIA; NETTO; COSTA, 2019). Uma das formas pela qual o homem vem causando degradação é por meio da poluição atmosférica, que pode ocorrer de diversas formas, estas são comumente separadas em duas categorias: fontes fixas e fontes móveis.

A primeira categoria é definida pela Resolução CONAMA nº436 de 2011 (BRASIL, 2011) como “qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria para a atmosfera, por emissão pontual ou fugitiva”. Dessa forma, esta categoria abrange em geral indústrias, que são as fontes de grande potencial poluidor. A poluição também pode ser gerada por fontes fixas naturais, como vulcões e maresia, que também podem influenciar a composição do ar. Já as fontes móveis são todos os tipos de automóveis que circulam, e, por isso, seu controle na fonte é muito mais complicado. O aumento da poluição atmosférica causada pode ser percebido mais intensamente em contextos urbanos devido ao aumento da frota de veículos e ao efeito de desfiladeiros urbanos (SALVA et al., 2021).

Entre os poluentes atmosféricos é possível classificá-los em primários e secundários, sendo os primários os contaminantes diretamente emitidos pelas fontes para o ambiente, como o MP, monóxido de carbono (CO), fuligem, óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), hidrocarbonetos, aldeídos e outros. Os secundários são resultados de reações entre poluentes primários com substâncias presentes na atmosfera e a radiação solar, como, por exemplo, a formação de ozônio troposférico (O₃), e a decomposição de NO_x em aldeídos, nitratos de alquila, O₃ e nitrato de peroxiacetila (PAN) (CÓNSUL et al., 2004; QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), 2020). Os poluentes mais estudados são: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), O₃ e dióxido de carbono (CO₂) e o MP com diâmetro inferior a 10 µm (MP₁₀) (DAVID; RIZOL; NASCIMENTO, 2017).

As principais fontes de emissão do NO por meio de atividades humanas são processos de combustão realizados com objetivo de cozinhar alimentos, gerar energia e movimentar motores, sejam industriais ou veiculares. O NO, não apenas é um problema por si só, mas ele também gera poluentes secundários como o NO₂ através de reações que ocorrem na atmosfera entre o NO e o oxigênio ou o O₃ (SOUZA; FRANCISCO; CARDOSO, 2017). Como efeitos da exposição de curto prazo ao NO₂ e NO_x pode-se citar reações inflamatórias dos pulmões e brônquios, sintomas como tosse, sibilos e problemas respiratórios, especialmente em pacientes com asma reconhecida ou outra doença respiratória crônica (KOWALSKA et al., 2020).

Outro poluente secundário gerado por reações que envolvem NO_x e presença de luz solar é o O₃ troposférico (MANTOVANI; NASCIMENTO; MOREIRA, 2016), o NO_x reage com o oxigênio, através do processo conhecido como smog fotoquímico, que ocorre mais intensamente em locais mais poluídos. Os males causados pelo O₃ podem ser irritação dos olhos, problemas pulmonares, alergias, entre outros, sendo ele junto com o MP os dois poluentes do ar que mais oferecem ameaças à saúde humana. É importante destacar que os problemas causados pelo O₃ ocorrem apenas na faixa de ar próxima da superfície terrestre, onde o gás é tóxico, já que na estratosfera ele tem um papel extremamente importante para a saúde humana (MONTE; ALBUQUERQUE; REISEN, 2017).

A presença de NO_x e de SO₂ na atmosfera também é responsável pelo fenômeno chamado de chuva ácida. Em condições livre de poluição o pH da água da chuva é em torno de 5,6, valores menores são característicos da chuva ácida e a presença destes poluentes pode ser atribuída à combustão de combustíveis fósseis, principalmente emissões veiculares e industriais (SILVA et al., 2020). A interação do SO₂ com outros compostos presentes na atmosfera ainda gera o ácido sulfúrico (H₂SO₄) um dos componentes da chuva ácida, que corrói metais, danifica materiais, tecidos e superfícies (MAIA; NETTO; COSTA, 2019).

Quanto ao CO, cerca de 90% da produção vem da combustão de automóveis e acontece em condições em que não há oxigênio suficiente para realizar a queima completa do combustível. Sua concentração pode chegar a um nível 100 vezes maior nas cidades do que nas áreas ao redor. Quando inalado em grande quantidade, diminui drasticamente a oxigenação dos órgãos e tecidos, podendo levar à morte, (MAIA; NETTO; COSTA, 2019) devido à afinidade do gás com a hemoglobina contida nos glóbulos vermelhos do sangue, que transportam O₂ para os tecidos de todos os

órgãos do corpo. O CO é o maior precursor do O₃ troposférico e pode ser usado como indicador de atividades humanas uma vez que sua origem, a queima, pode indicar a mudança de uso da terra como a substituição de florestas e savanas por agricultura e pastagem (SANTOS et al., 2017).

O MP consiste em partículas com diâmetro inferior a 100 µm que ficam suspensas no ar e podem ser inaladas, causando danos à saúde. Em especial aquelas com diâmetros abaixo de 10 µm (PM₁₀), também chamado de fração grossa ou partículas inaláveis, são ainda mais nocivas pois chegam mais longe no trato respiratório. De acordo com a WHO (2005), o MP_{2,5} (cujo diâmetro é menor que 2,5 µm, chamado de fração fina) é o que mais provoca efeitos na saúde humana. Alguns autores também fazem a distinção à fração do MP cujo diâmetro aerodinâmico varia de 0,1 a 2,5 µm e dão a esta o nome de fração ultrafina (HE; QIU; POTT, 2019).

A poluição atmosférica é a segunda principal causa de mortes por doenças não transmissíveis (DNT) depois do tabagismo. Em 2018, a poluição do ar externo e de ambientes internos foi reconhecida como um dos fatores de risco para DNTs, juntamente com dietas não saudáveis, tabagismo, uso nocivo de álcool e sedentarismo (WHO, 2019). A ocorrência e a gravidade de doenças alérgicas estão relacionadas à concentração de poluentes no ar, sendo este um fator ambiental de risco; e o aumento da densidade do tráfego e/ou residência nas proximidades de estradas principais estão associadas ao aumento da prevalência de sintomas alérgicos, nas vias respiratórias, e sintomas atópicos e/ou asmáticos em crianças (LEE; LEE; BAE, 2014). Estudos mostraram que a poluição do ar está associada também com maior risco de morte por síndrome respiratória aguda grave (SARS). A explicação para isso é que a exposição à poluição pode causar inflamações e doenças respiratórias e, conseqüentemente, predispor pacientes com SARS a apresentarem graves sintomas respiratórios e terem maiores riscos de morte (SHAO et al., 2021).

Em 2018, estimou-se que 4,5 milhões de pessoas morreram devido a exposição à poluição proveniente da queima de combustíveis fósseis (intervalo de confiança de 3,2 a 6,2 milhões). São atribuídos à poluição por MP_{2,5}, cerca de 3 milhões de mortes, já à poluição por O₃ cerca de 990 mil mortes e à poluição por NO₂, 500 mil. Em média, cada morte foi associada com uma perda de 19 anos de vida. Para além de mortes, à exposição a MP_{2,5} e O₃ troposférico de combustíveis fósseis foi atribuído como causa de cerca de 7,7 milhões de atendimentos de emergência relacionados a asma. Todos esses eventos causados pela poluição atmosférica têm

efeitos sobre a economia, uma vez que as doenças por ela causadas, como asma, diabetes, acidente vascular cerebral e doenças crônicas respiratórias interferem na redução da produtividade e no aumento do número de faltas no trabalho. Estima-se que a poluição por MP_{2,5} tenha sido responsável por 1,8 bilhões de dias de ausência do trabalho. Para crianças, crises de asma e ocorrências de dias em que essas crianças ficam doente afetam resultados de aprendizagem e forçam seus cuidadores a faltarem no trabalho. Além disso, todas essas situações acarretam mais custos aos sistemas de saúde (CREA, 2020).

O Centro de Pesquisa em Energia e Ar Limpo (CREA, sigla em inglês) estimou os custos econômicos gerados pelos efeitos da poluição atmosférica. Os resultados podem ser observados na TABELA 1:

TABELA 1 - Custo econômicos gerados pela poluição atmosférica.

| Causa | Custo em US\$ |
|-----------------------------------|---------------------|
| Incapacidade por doenças crônicas | 200 bilhões |
| Asma | 17 bilhões |
| Nascimentos prematuros | 90 bilhões |
| Licença médica | 100 bilhões |
| Mortes infantis | 50 bilhões |
| Mortes de adultos | 2400 bilhões |
| Custos totais | 2,9 trilhões |

FONTE: CREA (2020).

Esse valor de custos totais estimados em 2,9 trilhões de dólares representaram 3,3% do PIB global de 2018 o que mostra a dimensão do problema.

3.1.1 Material particulado e seus efeitos na saúde

A composição do MP é uma mistura de partículas sólidas e gotículas de líquido contendo *black carbon* (BC)¹, elementos inorgânicos, metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outras substâncias no ar. A emissão

¹ Fração do MP de base orgânica, o termo *black* refere-se a propriedades ópticas devido à alta capacidade de absorção de luz visível. As partículas têm aparência escura forte e variam em tamanho, mas geralmente são predominantes no MP fino. O BC é insolúvel em água e em solventes orgânicos e possui morfologia de pequenas esferas carbônicas agregadas (PIRACELLI et al., 2020).

de MP pode ser por meio de fontes antropogênicas como escapamentos de veículos, poeira das estradas, queima de carvão, processamento industrial, cimento e produção de fertilizantes, ou por fontes naturais como erupções vulcânicas, incêndios florestais, tempestades de areia e erosão do solo e da rocha. O MP também pode ser gerado a partir da nucleação, condensação ou coagulação de NO_x , SO_x , amônia e compostos orgânicos voláteis (VOCs) presentes no ar (DZIERŻANOWSKI et al., 2011; ZHU et al., 2018).

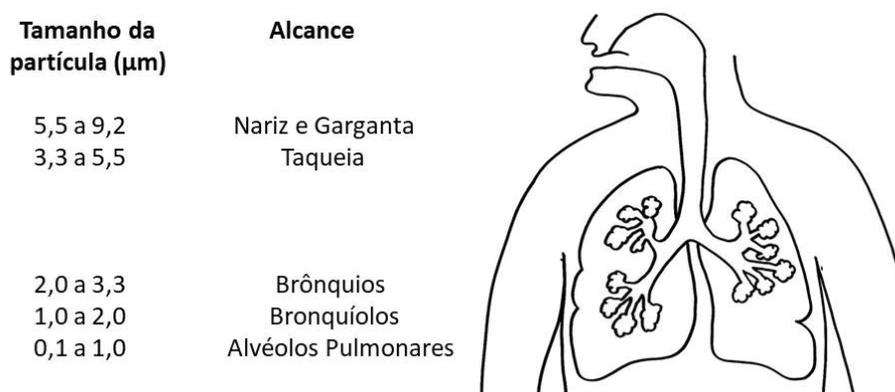
A porção grossa de MP se origina, predominantemente, de processos naturais e antropogênicos, mas a emissão da porção fina é causada, principalmente, pelo tráfego de veículos (HE; QIU; POTT, 2019). De fato, o MP relacionado ao tráfego é considerado responsável por grande parte da emissão antropogênica na área urbana (PANT; HARRISON, 2013) sendo 25% das emissões de $\text{MP}_{2,5}$ e MP_{10} causadas por tráfego em todo o mundo (KARAGULIAN et al., 2015). Grande parte deste MP, destas duas frações, contém compostos tóxicos como metais pesados dibenzo-*p*-dioxinas, dibenzofuranos e bifenilos policlorados, o que torna o poluente prejudicial à saúde humana (DZIERŻANOWSKI et al., 2011).

Ao ser inalado, juntamente com o ar, o MP é depositado em diferentes profundidades do sistema respiratório, isto está condicionado: ao tamanho das partículas, sendo que a fração grossa sofre deposição, principalmente nas vias extratorácicas; e a fração fina tem potencial de atingir os pulmões, podendo alcançar os bronquíolos e alvéolos; a fatores a) biológicos, como morfologia do pulmão e padrões de respiração, b) fisiológicos, como frequência da respiração (número de inspirações por unidade de tempo) e volume inalado em uma única inspiração (ambas dependentes da atividade física do indivíduo), e c) físicos, como dinâmica dos fluidos, propriedades da partícula e mecanismos de deposição; e ao tipo de respiração (HSIEH; LIAO, 2014; HOFMANN, 2011). Um estudo concluiu que o tipo de respiração (nariz ou boca) teve a maior influência sobre a penetração de partículas em diferentes profundidades do sistema respiratório, quando a respiração é feita pela boca, a passagem de partículas para as regiões torácica e inferior é maior, uma vez que a deposição é muito superior nas vias nasais (BROWN et al., 2013).

A FIGURA 1 mostra a capacidade de penetração da partícula no sistema respiratório de acordo com o seu diâmetro, nela é possível ver que quanto menor a partícula mais longe ela pode chegar. Os principais mecanismos físicos de deposição

de partículas no sistema respiratório são: impactação, sedimentação e difusão. O primeiro é mais efetivo nas vias aéreas superiores, onde as velocidades das partículas e do ar são maiores, e é favorecido quando o indivíduo está executando uma respiração mais rápida (na prática de esportes, por exemplo); os dois últimos têm maior eficiência nas vias aéreas inferiores, devido à velocidade mais baixa e tempo de permanência mais longo, sendo que o mecanismo da difusão se aplica especialmente em partículas de diâmetro menor que $0,5 \mu\text{m}$ nos alvéolos (HOFMANN, 2011; KEAST et al., 2022).

FIGURA 1 - DEMONSTRAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA PARTÍCULA NO SISTEMA RESPIRATÓRIO EM FUNÇÃO DO SEU TAMANHO.



FONTE: Adaptado de EMASP (2011).

Atualmente o MP é considerado o melhor indicador para os efeitos da poluição do ar ambiente na saúde (KARAGULIAN et al., 2015). Aproximadamente 40 mil crianças morreram antes de completarem 5 anos de idade devido a exposição à poluição de $\text{MP}_{2,5}$, proveniente de combustíveis fósseis. A exposição de mulheres grávidas a $\text{MP}_{2,5}$ aumenta o risco de nascimentos prematuros, resultando em uma estimativa de 2 milhões de mortes prematuras por ano atribuídas à poluição (CREA, 2020). Um estudo, feito nos Estados Unidos da América (EUA), sobre os efeitos de longo prazo da poluição atmosférica mostrou que cada $10 \mu\text{m}^{-3}$ de elevação na concentração de MP_{10} foi responsável por 6% do aumento do risco de mortalidade por problemas cardiopulmonares (CUI et al., 2003).

O catálogo de dados Global Health Data Exchange (GHDx) (2019), plataforma que disponibiliza dados relacionados à saúde em escala global, traz mais informações quanto aos riscos à saúde humana associados a exposição à poluição por MP. Na TABELA 2 é possível ver na primeira coluna a doença, na segunda coluna o valor de

porcentagem de mortes para o qual a doença foi a causa, e na terceira coluna o valor de porcentagem para o qual o MP foi atribuído como um fator de risco para a causa da morte, todos esses dados para o ano de 2019.

TABELA 2 - Custos econômicos gerados pela poluição atmosférica.

| Doença | Porcentagem do total de mortes (%) | Porcentagem atribuída ao MP como fator de risco (%) |
|---|------------------------------------|---|
| Crianças menores de 5 anos | | |
| Infecções respiratórias inferiores | 13,32 | 45,25 |
| Doenças neonatais | 37,34 | 19,79 |
| Diarreia | 9,92 | 2,08 |
| Meningite | 2,22 | 3,01 |
| Encefalite | 0,33 | 1,7 |
| Pessoas com 70 anos ou mais | | |
| Infecções respiratórias inferiores | 4,32 | 21,46 |
| Derrame | 15,29 | 20,75 |
| Doença pulmonar obstrutiva crônica | 8,77 | 32,3 |
| Câncer nos brônquios, traqueia e pulmão | 3,66 | 18,04 |
| Diabetes | 2,97 | 18,85 |
| Isquemia cardíaca | 20,76 | 15,14 |

FONTE: GHDx (2019).

Outras mortes ocorrem por doenças para o qual o MP não foi atribuído como fator de risco (HIV, tétano, câncer de próstata, Alzheimer, câncer de mama entre outros).

Todas as pessoas expostas a poluição são suscetíveis aos seus efeitos, contudo, algumas são mais que outras, estas são separadas em grupos de risco, que compreendem crianças, idosos, grávidas, pessoas em situação de vulnerabilidade socioeconômica e pessoas com doenças pré-existentes. Estudos indicam que o MP ainda causa maior risco relativo aos idosos, devido ao seu sistema imunológico debilitado, acumulação de substâncias tóxicas com o tempo e doenças pré-existentes

(SEGALIN; GONÇALVES; FORNARO, 2016). Na TABELA 2, é possível ver que o MP foi atribuído como fator de risco para mortes causadas por pelo menos seis doenças diferentes, para pessoas com 70 anos ou mais.

3.1.2 Legislação

Em 1972, foi realizada na capital da Suécia a Conferência de Estocolmo, promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU), com o objetivo melhorar a relação da sociedade com o meio ambiente e garantir que as necessidades da população atual sejam atendidas, sem comprometer as gerações futuras. Essa foi a primeira atitude mundial relacionada à preservação do meio ambiente. Na Declaração de Estocolmo, documento que resultou da conferência, estão descritos os princípios que buscam inspirar e servir como guia às nações. No princípio 2, aparece explícito a preservação do ar, proclama-se que:

os recursos naturais da terra incluídos o ar, a água, a terra, a flora e a fauna e especialmente amostras representativas dos ecossistemas naturais devem ser preservados em benefício das gerações presentes e futuras, mediante uma cuidadosa planificação ou ordenamento. (ONU, 1972, não p.).

Em 1992, aconteceu no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Cnumad). O evento mais conhecido como RIO-92, ECO-92 ou Cúpula da Terra marcou a forma como a humanidade encarava sua relação com o planeta. Na reunião, que ocorreu 20 anos depois da primeira conferência em Estocolmo, Suécia, os países reconheceram o conceito de desenvolvimento sustentável e começaram a planejar ações com o objetivo de proteger o ambiente. O principal documento produzido na RIO-92, o Agenda 21, é um programa de ação que viabiliza o novo padrão de desenvolvimento ambientalmente racional. Ele compila métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica. Este documento é estruturado em quatro seções subdivididas em 40 capítulos; nota-se que o Capítulo 9, pertencente à seção II, trata inteiramente sobre a Proteção da Atmosfera, fornecendo objetivos, bases para ação e atividades (MMA, 2020).

No Brasil, a primeira legislação de âmbito federal a determinar o controle da poluição do meio ambiente seja ar, água ou solo, em prol da qualidade ambiental foi o Decreto-Lei nº 1413 de 1975. O documento estabelece que as indústrias devem tomar as medidas necessárias para prevenir ou corrigir prejuízos ou inconvenientes gerados pela poluição e contaminação do meio ambiente (BRASIL, 1975). Apesar de estabelecer que Estados e Municípios, dentro de suas competências, poderão estabelecer condições para o funcionamento de empresas, na época, nenhum parâmetro ou limite de emissão foi criado ainda.

No ano de 1981, foi instituída no Brasil a Política Nacional do Meio Ambiente, Lei nº 6938, cujo objetivo é a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida. Contudo, isso deve ser feito assegurando condições de desenvolvimento socioeconômico e atendendo a diversos princípios, sendo dois deles a racionalização do uso do ar e controle e zoneamento das atividades potencial ou efetivamente poluidoras (BRASIL, 1981).

A poluição do ar se dá não apenas por meio de indústrias (fontes fixas), mas também pelos veículos, em 1986 o CONAMA criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) por meio da Resolução nº 18 de 1986 (BRASIL, 1986). Para complementar o PROCONVE, em função do crescimento do uso de motocicletas e veículos similares, em 2002 foi instituído o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), por meio da Resolução CONAMA nº 297 (BRASIL, 2002). Estas ações promoveram efeitos positivos, nos dias de hoje os veículos novos são menos poluidores devido às soluções tecnológicas fornecidas pelas indústrias automobilísticas, à melhoria da qualidade dos combustíveis e às restrições impostas por estes programas (LOPES et al., 2018).

A Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989 (BRASIL, 1989), criou o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR fixando parâmetros para a emissão de poluentes gasosos e materiais particulados (materiais sólidos pulverizados) por fontes fixas e determinou a necessidade de se estabelecer limites máximos de emissão e a adoção de padrões nacionais de qualidade do ar.

A Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990 (BRASIL, 1990), estabelece os conceitos de padrões de qualidade e os divide em primários e secundários. De acordo com o Artigo 3º desta Resolução, os poluentes legislados pelo conselho são: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis (MP₁₀),

dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Esta resolução ainda não legislava sobre o MP_{2,5}, este último poluente teve seus limites estabelecidos mais tarde pela Resolução CONAMA n° 491 de 2018 que revogou a n° 3 (BRASIL, 2018).

A emissão por fontes fixas é regulada pela Resolução CONAMA n° 436 (BRASIL, 2011), que estabelece os limites máximos de emissão de poluentes para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Para as fontes instaladas a partir de 2007 se aplicam a Resolução CONAMA n° 382, de 26 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006), e ela trouxe uma mudança de abordagem, já que nas resoluções anteriores do PRONAR considerava-se a qualidade do ar como parâmetro básico, admitindo-se emissões maiores onde as condições atmosféricas fossem mais favoráveis, porém, a partir desta última, foram fixados limites específicos de emissão para cada tipo de fonte ou combustível utilizado.

A qualidade do ar geral no entorno é regulada pela Resolução CONAMA n° 491 (BRASIL, 2018), e os padrões de qualidade do ar definidos nesta resolução serão adotados em quatro etapas, PI-1, PI-2, PI-3 e PF, respectivamente. A etapa em vigor atualmente, ainda, é a etapa PI-1. Para esta fase, os padrões para o MP₁₀ são de 120 µgm⁻³ para 24 horas e 40 µgm⁻³ para uma média anual. Como já citado anteriormente, essa é a primeira resolução que apresenta limites para o MP_{2,5}, e para este poluente os padrões são de 60 µgm⁻³ para 24 horas e 20 µgm⁻³ para uma média anual.

A nível estadual, no Paraná, as fontes fixas são reguladas pela Resolução SEMA n° 16 (PARANÁ, 2014) que define critérios para o Controle da Qualidade do Ar, impondo limites mais rígidos que a CONAMA n° 436. A lei estadual se mostra bastante completa impondo limites não apenas de acordo com o combustível utilizado na atividade, mas também de acordo com a atividade em si.

3.2 REMEDIAÇÃO

3.2.1 Biorremediação

A biorremediação é um método utilizado no tratamento de locais contaminados e pode ser definida como a aplicação de processos biológicos ou o uso de agentes biológicos capazes de modificar ou decompor poluentes, transformando-

os em substâncias menos complexas. Ela pode ocorrer de forma natural, sem qualquer interferência de tecnologias ativas de remediação ou pode ser realizada utilizando-se técnicas que a potencializem (BISOGNIN et al., 2018; FARIA et al., 2017). A biorremediação tem sido usada de forma bem sucedida para descontaminação de solo, águas subterrâneas e superficiais. Esta técnica, além de apresentar menores custos econômicos, pode gerar menores danos para o ambiente quando comparadas a outras formas físicas e químicas de remediação (CUBA et al., 2019).

De fato, ela tem sido empregada para diversos fins como remoção de toxinas de poços subterrâneos, na descontaminação do solo, em derrames químicos de diesel, gasolina, petróleo, degradação de herbicidas, decomposição de substâncias orgânicas e inorgânicas, entre outros. A biorremediação pode ocorrer de duas formas diferentes quando considerado o local onde será realizada, ela pode ser *in situ* e *ex situ*. A primeira é realizada no próprio local onde ocorreu a poluição, não havendo necessidade da remoção e deslocamento do material contaminado, o que evita custos e mais perturbações ambientais no local já afetado. Na biorremediação *in situ* podem ser empregadas as técnicas biorremediação passiva ou intrínseca², bioestimulação (adição de nutrientes orgânicos e inorgânicos), aumento (inoculação de microrganismos com alto potencial de degradação), *air aparging* (biodegradação dos contaminantes pela atividade bacteriana aeróbica) e bioventilação (adição de oxigênio no solo contaminando que estimula o crescimento dos microrganismos naturais e/ou introduzidos pela bioaugmentação) (COUTINHO et al., 2015).

A biorremediação *ex situ* exige a remoção do solo ou da água contaminada e o tratamento é realizado em outro local, para esta algumas das técnicas empregadas são *Landfarming* (remoção biológica dos resíduos dos solos contaminados), biorreatores (uso de reatores para produzir reações químicas catalisadas por biocatalisadores) e compostagem (COUTINHO et al., 2015). Nota-se que essas técnicas citadas são utilizadas para a remediação do solo e da água, para o ar a fitorremediação pode ser adotada.

² Remediação realizada pelos microrganismos do próprio local, sem qualquer interferência de tecnologias ativas (COUTINHO, 2015).

3.2.2 Fitorremediação

A fitorremediação utiliza plantas para descontaminação de solos, água e ar poluídos; para tal a espécie remediadora deve apresentar características necessárias para que o processo seja eficaz, sendo a principal delas a de ser tolerante a altos níveis do contaminante, no ambiente a ser remediado (FRANCO et al., 2014). Se consideradas as condições brasileiras, essa técnica pode ser muito promissora tendo em vista a enorme biodiversidade e o clima tropical do país (COUTINHO et al., 2015). Para fitorremediação de solos e da água, podem ser empregadas as técnicas de rizofiltração (tratamento de água no qual os contaminantes são removidos e retidos no vegetal), fitoextração (contaminantes são removidos do solo e retidos no tecido vegetal), fitotransformação (degradação dos contaminantes através do metabolismo da planta, pode ser aplicada ao tratamento da água e do solo), fitoestimulação (estimulação da atividade dos microrganismos degradadores dos contaminantes pela rizosfera da planta) e fitoestabilização (utilização das plantas para reduzir a migração dos contaminantes no solo) (JACQUES; BENTO; ANTONIOLLI, 2007).

Apesar da literatura atual tratar em sua maioria da fitorremediação de solos e águas essa técnica também pode ser empregada com o objetivo de minimizar poluentes atmosféricos. Nos Estados Unidos, quase 0,22 milhão de toneladas de MP_{10} são capturadas por vegetação todos os anos (NOWAK; CRANE; STEVENS, 2006). Na cidade de Chicago, estima-se que no ano de 1991 as árvores foram responsáveis por remover aproximadamente 234 toneladas de MP_{10} e a qualidade média do ar, por hora, melhorou em 0,4% (2,1% em áreas densamente arborizadas), esta fitorremediação teve seu custo de oportunidade estimado em 9,2 milhões de dólares (MCPHERSON; NOWAK; ROWNTREE, 1994).

É importante ressaltar a diferença entre as técnicas de fitorremediação e biomonitoramento, sendo a segunda um método de análise experimental que permite avaliar a presença de poluentes utilizando organismos vivos, que são denominados bioindicadores. Esta é uma ferramenta útil que fornece informações rápidas e seguras sobre a influência dos poluentes na biota, além de fornecer dados que podem ser comparados com informações obtidas pelos métodos convencionais de monitoramento do ar atmosférico, portanto, este método não visa a remediação ou minimização dos poluentes presentes no ar. As plantas bioindicadoras reagem ao

estresse promovido por substâncias que se acumulam em seus tecidos, ocasionando modificações bioquímicas, fisiológicas e morfológicas (TEIXEIRA; BARBÉRIO, 2012).

3.2.2.1 Fatores que influenciam a fitorremediação

Cinco processos mecânicos regem a deposição no MP nas folhas, são eles: sedimentação por gravidade, difusão browniana, interceptação, impactação inercial e impactação turbulenta (ZHANG et al., 2019). Porém, de acordo com BECKETT; FREER-SMITH; TAYLOR (1998) as partículas são removidas por um dos seguintes cinco processos: sedimentação, difusão, turbulência, lavagem e deposição oculta (deposição de poluentes solúveis e insolúveis, por impacto, junto com gotículas de nuvem impulsionadas pelo vento). A deposição de MP₁₀ e outros poluentes na chuva e neve seguido de lavagem é comumente chamada de deposição úmida e, para os autores, o termo deposição úmida inclui a deposição oculta. A deposição seca de partículas e gases ocorre pelos três primeiros processos listados acima.

A impactação em uma corrente de ar turbulenta é um dos processos de deposição pelo qual as árvores retêm as partículas. Ambientes urbanos podem favorecer isso tendo em vista suas estruturas complexa e rugosa. Da mesma forma, embora em menor grau, o mesmo acontece com os bosques de muitas áreas rurais. As correntes de vórtice criadas pela interface entre os elementos urbanos, como estradas e prédios, são um exemplo de situação localizada em que impactação e, portanto, eficiência de captura, é provavelmente maximizada. O conhecimento desses efeitos tem implicações importantes para a disposição de árvores dentro das cidades visando uma interceptação mais eficaz e um melhoria na qualidade do ar (BECKETT; FREER-SMITH; TAYLOR, 2000).

A interceptação direta ocorre quando uma partícula é depositada por uma corrente de ar ou gravidade sobre uma superfície; e a impactação inercial ocorre quando o momento de uma partícula a carrega através da corrente de ar que circula em torno da superfície. As partículas serão depositadas a favor do vento em um objeto adequado, como uma folha ou caule, devido à ação de correntes de vórtices. As propriedades atrativas e reativas de algumas partículas fazem com que elas se aglomerem em partículas maiores que então caiam na terra por sedimentação. De início, a aglomeração é promovida pelas forças que fazem com que as partículas se encontrem, que podem ser desde movimento browniano em escala nanométrica (para

partículas geralmente com diâmetros menores que 0,1 μm) e ventos e correntes de ar convectivas acima da faixa de tamanho de micrón. Pode ocorrer também o fenômeno chamado crescimento higroscópico, no qual partículas absorvem umidade e se expandem, então caem por deposição oculta ou como gotas de chuva se a umidade for alta o suficiente. Dessa forma, o tempo de residência das partículas aumentará, significativamente, durante longos períodos quentes e de baixa umidade, já que os processos de lavagem e crescimento higroscópico funcionarão com menos eficácia (BECKETT; FREER-SMITH; TAYLOR, 1998; PETROFF et al., 2008).

A capacidade das plantas de acumular MP indica que existem diferenças entre as espécies relacionadas às propriedades da superfície da folha. As árvores em virtude de terem grande área foliar total, são o tipo de planta mais eficaz para esse fim. Algumas características específicas das folhas podem melhorar este processo de remediação do ar poluído, assim como configurações de galhos e folhagens e condições meteorológicas (WANG et al., 2015).

Características morfológicas, como rugosidade superficial e presença de tricomas (estruturas parecidas com pelos também chamados de *leaf hair*) se mostraram positivamente associadas com a quantidade de MP retido pelas folhas. Há também influência do nível de exposição a poluição ao qual a planta foi submetida, a quantidade de poluente depositado nas superfícies das folhas depende fortemente de sua concentração no ar, sendo maior em locais mais poluídos (POPEK et al., 2018).

Da mesma forma, características microestruturais da folha como superfícies ásperas, quantidade de cera epicuticular, baixa molhabilidade da folha e baixa densidade estomática e características macroestruturais, como altura da planta, arranjos de folhas espiraladas, maior área foliar e menor comprimento do pecíolo são todas características que aumentam o acúmulo de MP. Estudos mostram que o acúmulo de MP é maior em folhas que possuem tricoma, porque os tricomas da folha não só aumentam a área de superfície, que pode interceptar mais poluente, mas também tornam menos provável que MP seja deslocado quando as folhas se movem, impedindo assim que volte a ficar suspensos no ar, além disso ranhuras paralelas nas folhas também podem prevenir sua ressuspensão (ZHANG et al., 2019). Possuir folhas largas, com superfícies rugosas, também torna a espécie mais eficaz na captura de MP quando comparado com espécies que possuem folhas com superfícies lisas (BECKETT; FREER-SMITH; TAYLOR, 2000).

Um fator importante para a retenção do MP é a quantidade de cera epicuticular presente nas folhas. Por meio de processos evolutivos, devido às condições ambientais, as plantas desenvolveram uma camada denominada cutícula ou membrana cuticular e que faz interface com o meio ambiente. A cutícula é considerada a parte mais importante da epiderme e é a primeira barreira à entrada de produtos químicos aplicados na folha. Sua composição química varia até mesmo entre espécies do mesmo gênero, sendo a cutina e a cera os principais constituintes. A cutícula é composta pela cutina, uma matriz de lipídios polimerizados; permeada por ceras cuticulares e cobertas por ceras epicuticulares. As ceras são constituídas por hidrocarboneto, álcool, cetona, aldeído e ácido graxo e podem também estar presentes compostos cíclicos e aromáticos, como flavonóides e terpenóides. As ceras apresentam diferentes características morfológicas e essa morfologia diversificada pode ser determinante para caracterizar um gênero ou uma espécie (RAMOS, 2017).

As agulhas (folhas longas e finas) de árvores coníferas, que produzem uma camada de cera epicuticular mais espessa, são mais eficazes no acúmulo de MP do que as espécies de folhas largas (DZIERŻANOWSKI et al., 2011), da mesma forma para árvores *B. pendula* cultivadas na Noruega, com altos níveis de ceras resultaram em um aumento da quantidade de wMP (material particulado retido na cera) chegando a 83% do MP total (POPEK et al., 2018).

O MP se depõe sobre a superfície das folhas das plantas, uma parte fica apenas superficialmente deposta, a essa dá-se o nome de sMP (material particulado superficial), e após essas folhas serem lavadas pela chuva o poluente carregado pela água não mais retornará a ficar suspenso no ar e a causar danos; a parcela orgânica é decomposta por processos naturais e a inorgânica fica acumulada no solo. Após a chuva, a folha está limpa e pronta para acumular mais poluente. Outra parcela do poluente depositado fica retida na cera epicuticular presente na folha, esta parcela não é carregada pela chuva e a ela dá-se o nome de wMP. O MP que contém alguns poluentes orgânicos pode ser de natureza lipofílica e, portanto, capaz de penetrar na camada de cera que cobre as folhas e galhos jovens (DZIERŻANOWSKI et al., 2011).

Estudos mostram que a remoção de MP pela chuva varia por espécie de árvore e quantidade de precipitação. Uma chuva de 20 mm é capaz de remover de 30 a 40% de MP das folhas de *Pinus sylvestris* (PRZYBYSZ et al., 2014). Já para as folhas da espécie *Ligustrum*, chuvas de 10 e 32 mm são capazes de retirar 28 e 48% do MP acumulado, respectivamente. A relação entre a taxa de remoção e a duração da chuva

mostrou que as taxas de remoção de MP dependem parcialmente da duração da chuva, uma vez que dependem fortemente da quantidade de MP que foi retido pela folha antes da chuva. Sob a mesma quantidade de precipitação total, para superfícies lisas, chuvas de baixa intensidade e de longa duração proporcionam condições para maiores taxas de remoção de partículas, enquanto para superfícies ásperas, chuvas de alta intensidade e de curta duração criam condições para as taxas mais altas de remoção de MP (ZHANG et al., 2019).

Ao analisar o sMP, mais partículas são retiradas pela chuva se comparado a lavagem em laboratório de amostras, porque a chuva contínua leva a um maior tempo de contato entre a água e as partículas, e a alta energia cinética das gotas de chuva pode remover mais MP ao impactar a superfície da folha. De fato, a energia cinética da chuva é o fator predominante no processo de lavagem. Experimentos mostraram que a proporção de remoção de MP₁₀₋₁₀₀ e MP_{2.5-10} foi diferente da proporção retida nas superfícies das folhas, o que pode sugerir que a chuva é capaz de mudar a morfologia do MP ao dissolver os constituintes solúveis das partículas durante o evento de chuva. Grande parte da fração ultrafina é composta por aerossol, contendo componentes solúveis, como sulfato, nitrato e cloreto, que diminuem de tamanho à medida que se dissolvem na água, os particulados insolúveis aquosos representam apenas uma pequena proporção do MP ultrafino. Deve-se também considerar que a chuva é capaz desagregar partículas grandes em partículas menores já que alguns particulados finos podem se aglomerar em partículas maiores no ar e que podem cair sobre as superfícies das folhas por meio de sedimentação (ZHANG et al., 2019).

O acúmulo exagerado de MP na folha também afeta negativamente o processo de fotossíntese das plantas, o que pode reduzir sua produtividade e funcionalidade, contudo, outros fatores relacionados ao meio urbano também podem afetar a fotossíntese como compactação do solo, déficit e contaminação da água, limitação de luz e espaço e alta temperatura (POPEK et al., 2018). Apesar disso, o uso de plantas na remediação MP traz muitos benefícios e a escolha certa de tipo de planta e local onde ela vai ser plantada pode ser uma forma de driblar esses fatores negativos.

Com a aplicação de modelos matemáticos baseados em dados fisiológicos e meteorológicos concluiu-se que árvores também podem remediar outros poluentes, absorvendo até 21 e 20% das concentrações de O₃ e SO₂ as quais foram expostas, respectivamente, o que mostra que o uso de vegetação em meio urbano pode ser

muito benéfico não só para a remediação do MP. O uso mais eficiente das árvores acontece quando o plantio é feito o mais próximo possível do local da fonte de poluição. Estudos mostraram que mais de 50% da poeira produzida em uma mina de carvão na cidade de Kansk, na Rússia, foi capturada pela vegetação que estava dentro de um raio de 15 m da mina (BECKETT; FREER-SMITH; TAYLOR, 1998). Corroborando com esse dado, estudo na Bélgica mostrou que a interceptação de partículas pela vegetação foi muito maior por árvores de rua dado a sua proximidade com altas intensidades do tráfego (IMPENS; DELCARTE, 1979).

Como um aerossol, o MP pode ser suspenso no ar por semanas e pode ser transportado por longas distâncias da fonte de emissão (POPEK et al., 2018), por isso é importante que seja interceptado o mais próximo possível da fonte. Espaços urbanos impõem várias barreiras ao cultivo de plantas como condições e compactação do solo e espaço disponível; como alternativa a estes problemas o uso de paredes verdes pode ser uma solução (HE; QIU; POTT, 2019), uma vez que usam apenas muros, cercas ou paredes como apoio e não ocupam espaço no solo. As plantas cultivadas nestas paredes podem interceptar mais partículas e propiciar uma fitorremediação mais eficiente se estiverem inseridas nos centros urbanos, pois estão mais perto da fonte de emissão.

3.3 PAREDES VERDES

O uso de plantas trepadeiras para cobrir a fachada de uma edificação, muro ou algum outro elemento pode ser chamado de parede verde ou pele-verde, é uma técnica de baixo impacto ambiental e traz benefícios para a edificação e seu entorno. Paredes verdes já foram reconhecidas como um sistema passivo de redução da poluição do ar que requerem ajustes mínimos ao ambiente construído. Para além da minimização da poluição, também trazem vantagens como diminuição de gastos com energia para o resfriamento do ambiente. A parede verde promove isolamento térmico, devido a uma camada de ar permanente entre as folhas das plantas e a parede do edifício, além de reduzir a incidência de raios solares diretamente na parede (VALESAN; FEDRIZZI; SATTLER, 2010; PAULL et al., 2021).

Foi conduzido, em Singapura, um estudo onde simulou-se, por meio de programas computacionais, as temperaturas médias radiantes para edifícios com características similares com e sem paredes verdes. Para aqueles que fazem uso

dessa técnica obteve-se uma média de 24,01 °C, já para os que não tinham vegetação presente em sua fachada a média ficou em 34,39 °C (WONG et al., 2009). Similarmente, na região norte da Grécia, comparou-se medições de dados térmicos de dois pavimentos da fachada de uma mesma edificação, um pavimento com revestimento de vegetação e outro sem. Os resultados indicaram redução de 5,7 °C, em média, na temperatura da superfície externa do pavimento revestido, além da redução de 0,9 °C, em média, na superfície interna. Além disso, a influência de plantas trepadeiras em paredes mostrou-se mais crítica em dias muito quentes, o efeito de resfriamento nas superfícies externas e internas da parede devido à vegetação foi muito profundo, e os ciclos diurnos de temperatura para paredes cobertas por plantas são consideravelmente atenuados em comparação com as sem cobertura (EUMORFOPOULOU; KONTOLEON, 2009). A presença de vegetação nas fachadas também pode ser benéfico no inverno, pois promove isolamento térmico e reduz a perda de calor por convecção para o ambiente externo (JOHNSTON; NEWTON; GREATER LONDON AUTHORITY, 2004).

Sabe-se também que a presença de vegetação em áreas urbanas desempenha efeito benéfico para a redução da temperatura externa e mitigação do efeito de ilha de calor urbana, ajustando o clima urbano local e minimizando as mudanças microclimáticas futuras (WANDERLEY; MIGUEL, 2019). A ausência da vegetação urbana contribui para o aumento da temperatura do ar devido ao aquecimento das superfícies, como ruas, edifícios e coberturas, ao longo do dia e na redução de superfícies evaporativas que realizam trocas térmicas úmidas, o que consequentemente influencia na umidade do ar. Além disso, outros fatores também contribuem para esse efeito como uso de materiais que armazenam grande parte do calor sensível devido às suas propriedades térmicas e emissão de calor antropogênico gerado pela queima de combustível fóssil. O plantio de árvores e cultivo de outros tipos de plantas em tetos verdes, paredes verdes e jardins ao longo da altura dos edifícios podem ser uma estratégia viável para mitigar esse aquecimento nos centros urbanos (SHINZATO; DUARTE, 2018).

Grandes áreas de vegetação também podem auxiliar na redução dos níveis de ruído. Superfícies duras de concreto e vidro podem aumentar a velocidade do escoamento superficial da água da chuva em direção à rua ou ao sistema de esgotamento, já as plantas são capazes de reter a água na superfície das folhas por mais tempo. Paredes verdes ainda tem um motivo estético para serem usadas, uma

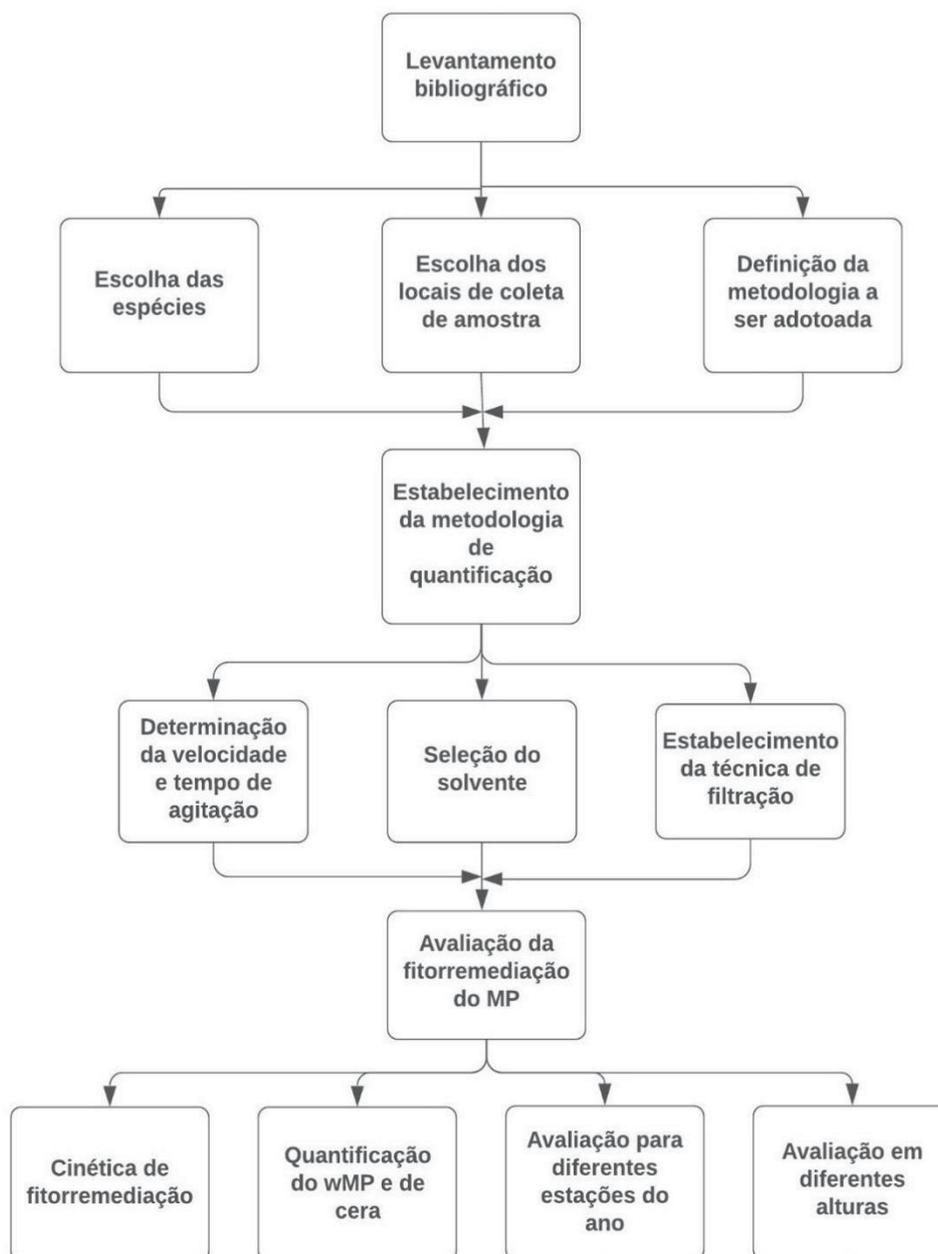
vez que trepadeiras podem melhorar o design, e, em alguns casos, disfarçar o mau design. Casos de esverdeamento das laterais que acontecem em muitos edifícios, que são frequentemente feios, podem ser escondidos. Elas também podem fornecer locais de descanso e alimentação para pássaros, invertebrados e até pequenos mamíferos. Paredes antigas ainda existem, apesar de séculos de crescimento das plantas, sustentando a visão de que qualquer dano causado pelas plantas às paredes é muito lento (JOHNSTON; NEWTON; GREATER LONDON AUTHORITY, 2004).

Como desvantagens das paredes verdes pode-se citar erro de projeto e de plantio, em geral, com escolha inadequada de espécie, como principais problemas. Esses erros podem ser o dimensionamento incorreto do suporte da vegetação, escolha de uma espécie que necessite de mais espaço para se desenvolver do que o disponível e manutenção insuficiente, levando a desenvolvimento deficiente e/ou desordenado. Além disso, se ocorrem falhas no revestimento ou se este for de baixa qualidade isso pode acarretar danos à edificação, mesmo que a escolha da espécie tenha sido adequada, como danos à pintura, por exemplo; contudo, se a parede verde for considerada algo vitalício, a pintura deixa de ser relevante. Outra desvantagem que pode ser citada é a presença de animais indesejados, como lesmas e formigas que são atraídos pela vegetação (VALESAN; FEDRIZZI; SATTTLER, 2010).

4 METODOLOGIA

A FIGURA 2 mostra o diagrama com os passos da metodologia e suas sequências de execução adotados neste estudo.

FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.



FONTE: A autora (2021).

4.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado na cidade de Curitiba que é o maior centro urbano do estado do Paraná, Brasil. A cidade possui população estimada para 2020 de

1.948.626 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2020) e o índice de desenvolvimento humano (IDH) de 0,823 (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA), 2016). Curitiba tem altitude de aproximadamente 934 m acima do nível do mar, com clima predominantemente mesotérmico, com verão fresco (Cfb), segundo a classificação de Koeppen, ou clima subtropical de altitude (KRÜGER; ROSSI, 2015).

Neste centro urbano foram obtidas informações sobre as médias anuais de temperatura, de precipitação e de umidade. Na cidade também foram identificadas regiões de alto tráfego de veículos para verificar a efetividade da fitorremediação em paredes verdes. A área de estudo foi escolhida por possuir, além do alto tráfego de veículos leves e pesados, grande extensão linear, sistema de monitoramento de qualidade do ar e ter paredes verdes já existentes e adaptados ao clima local.

4.1.1 Escolha do sítio de estudo e das espécies

A escolha do sítio de estudo baseou-se nos seguintes critérios: região de tráfego intenso de carros e ônibus; facilidade alta para a coleta devido a sua proximidade com os laboratórios onde foram feitas as análises; presença de uma estação de monitoramento da poluição do ar próxima; preferência por presença de paredes verdes. Potenciais ruas e avenidas foram elencadas e analisadas de acordo com os critérios descritos.

Um levantamento prévio de espécies vegetais foi realizado para identificar espécies bem adaptadas ao clima da cidade de Curitiba, elencou-se as seguintes espécies: *Hedera helix*, *Hedera caucasigen*, *Senecio macroglossus*, *Ficus pumila L.*, *Parthenocissus tricuspidata*, *Buxus sempervirens*, *Cycas revoluta*, *Platyclusus orientalis*, *Liquidambar styraciflua* e *Jacaranda mimosifolia*.

Os critérios de escolha para as espécies estudadas foram: presença na área/sítio de estudo escolhido; espécimes em idade adulta; proximidade com as fontes de emissão aérea; possibilidade de cultivo em paredes verdes; facilidade de acesso ao local e consequente autorização para a coleta; viabilidade de cultivo futuro das espécies para uma configuração urbana (locais públicos e residenciais).

4.2 DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE MP

Os dados de concentração de MP que foram usados neste trabalho foram coletados pela da rede de monitoramento do Laboratório de Computação e Tecnologia em Engenharia Ambiental (LACTEA/UFPR).

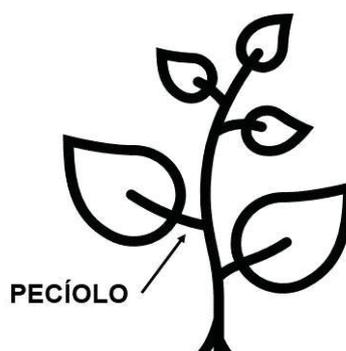
Atualmente este projeto conta com oito estações de medição em Curitiba e região metropolitana: Bairro Estação/Araucária, Batel, Boa Vista, Guaíra, Jardim Botânico, Jardim das Américas, Mercês e Orleans (LACTEA, 2020). Para este trabalho foi feita a média das médias diárias de concentração de MP no ar para os dias consecutivos sem chuva considerados para a coleta.

4.3 COLETA E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS

Amostras de folhas foram coletadas em uma quantidade que garantiram um tamanho de amostra superior a 400 cm². De acordo com DZIERŻANOWSKI et al. (2011), valores de amostras entre 300 e 400 cm² são ideais para estudos de fitorremediação, pois garantem uma quantidade suficiente de poluente para a quantificação e evitam o entupimento de filtros. Contudo, devido as características da *Ficus pumila L.*, que apresenta grande variação no tamanho de suas folhas, não foi possível determinar um número exato de folhas a ser coletado. Desta forma, optou-se por manter o tamanho das amostras acima de 400 cm², não ocorreu entupimento dos filtros em nenhum experimento.

A coleta se deu da seguinte forma: o pecíolo da planta (estrutura que liga a folha ao caule, mostrado na FIGURA 3 foi cortado com uma tesoura evitando-se ao máximo o contato das mãos com a superfície da folha.

FIGURA 3 - IMAGEM ILUSTRATIVA DO PECÍOLO.



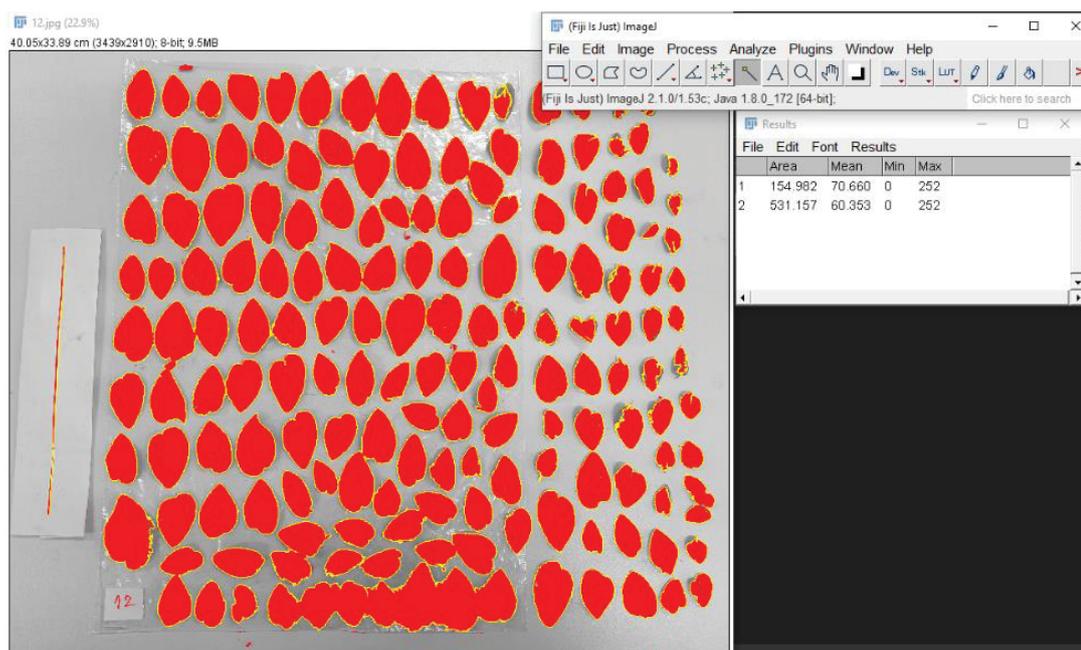
FONTE: A autora (2021).

As folhas foram colocadas em um saco plástico etiquetado e identificado e armazenado em uma caixa rígida de plástico até o momento de sua análise no Laboratório de Catálise e Processos Químicos (LCPQ) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Para o intervalo de dias consecutivos sem chuva, considerado pré-coleta, foram desconsideradas todas as chuvas registradas durante o período se a soma destas foi menor ou igual a 1 mm. Os dados de precipitação foram obtidos do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) (2021).

As folhas utilizadas na análise foram fotografadas e sua área foliar foi calculada utilizando o *software* livre *ImageJ* (RASBAND, W.S). O resultado fornecido pelo *software* está exemplificado na FIGURA 4:

FIGURA 4 - RESULTADO FORNECIDO PELO SOFTWARE IMAGEJ PARA O CÁLCULO DA ÁREA FOLIAR.



FONTE: a autora (2021).

4.4 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DE MP

As análises laboratoriais foram realizadas no dia da coleta da amostra ou no dia seguinte. Os ensaios foram feitos em triplicata no LCPQ (UFPR). Os procedimentos de segurança para o COVID-19 foram cumpridos.

4.4.1 Material Particulado Superficial (sMP)

A amostra de folhas foi colocada em um béquer com 100 mL de água destilada e agitada para quantificar o sMP retido. O saco plástico que continha a amostra de folhas foi lavado com 100 mL de água destilada, agitado, e a água vertida para o mesmo béquer. A suspensão de MP foi filtrada, primeiramente, por uma peneira de metal de retenção 53 μm e, posteriormente, pelos meios filtrantes escolhidos para cada ensaio. Realizou-se secagem prévia do meio filtrante em estufa da marca SOLAB modelo SL-102 a 60 °C por 4 horas, após retirado da estufa ele foi colocado no dessecador até atingir a temperatura ambiente e pesado em balança analítica da marca SHIMADZU modelo AUY220. A massa do meio filtrante seco foi anotada. Após a filtração, mais 50 mL de água destilados foram colocados no béquer e agitados, manualmente, para recuperar o MP eventualmente aderido nas paredes do béquer.

Para a filtração utilizou-se um funil de *Buchner* conectado a bomba de vácuo PRIMAR modelo 121 ligada por 5 min. O meio filtrante foi secado na estufa à temperatura de 60 °C por 4 horas e passado para o dessecador. O processo de resfriamento foi acompanhado com dois termômetros, um mantido dentro do dessecador e um fora. O meio filtrante foi pesado quando os dois termômetros mostraram a mesma temperatura, ou seja, quando o meio filtrante atingiu a temperatura ambiente. A pesagem do meio filtrante ocorreu da mesma forma que no preparo dos meios filtrantes. A FIGURA 5 mostra o passo a passo da metodologia descrita.

FIGURA 5 - METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DO sMP.



FONTE: A autora, 2022.

A massa de sMP presente na amostra de folhas foi calculado pela equação (1) e foi expressa como a quantidade de MP depositado na superfície da folha por unidade de área foliar (μgcm^{-2}).

$$M_{MP} = (M_f - M_i)/A_T \quad (1)$$

Onde:

M_{MP} : massa de MP por unidade de área foliar (μgcm^{-2});

M_f : peso do meio filtrante após a filtração (g);

M_i : peso do meio filtrante antes da filtração (g);

A_T : área total da superfície foliar (cm^{-2}).

4.4.2 Material Particulado presente na cera (wMP)

Para determinar a parcela de MP que ficou retida na cera epicuticular das folhas, wMP , faz-se necessário dissolver a camada de cera para separá-la do poluente. A metodologia consistiu em agitar a amostra de folhas imersas por 40 s em 150 mL do solvente orgânico selecionado.

Os processos de filtração e pesagem ocorreram da mesma forma como descrito no item 4.4.1. O béquer no qual a amostra foi agitada com solvente teve seu peso vazio anotado, e, após a filtração, o solvente foi vertido novamente no béquer e deixado para evaporação. A evaporação do solvente ocorreu à temperatura ambiente. Após o solvente ter evaporado completamente, o béquer foi pesado e a massa de cera presente na amostra foi determinada por diferença de peso. A FIGURA 6 mostra o passo a passo da metodologia descrita.

O valor de cera epicuticular obtido foi dividido pela área da amostra para que a quantidade fosse expressa em μgcm^{-2} , como na equação (2).

$$M_W = (MB_f - MB_i)/A_T \quad (2)$$

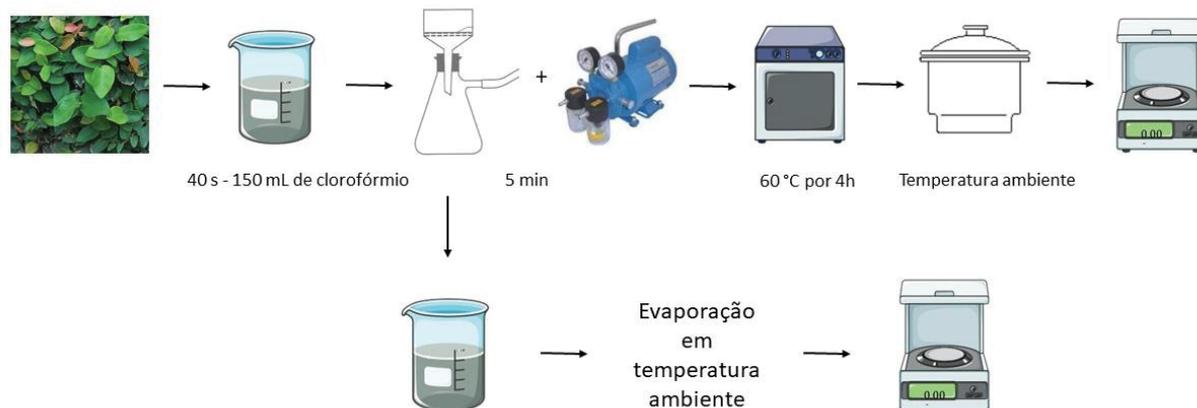
Onde:

M_W : massa de cera por unidade de área foliar (μgcm^{-2});

MB_f : peso do béquer após a evaporação do solvente (g);

MB_i : peso do béquer vazio (g);

A_T : área total da superfície foliar (cm^{-2}).

FIGURA 6 - METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DO wMP .

FONTE: A autora, 2022.

4.4.3 Estabelecimento da metodologia de quantificação de MP fitorremediado

4.4.3.1 Determinação da velocidade adequada e tempo ótimo de agitação

Foram realizados ensaios de velocidade e tempo de agitação, fixou-se o tempo e se variou a velocidade. Uma amostra foi agitada em velocidade lenta e outra em velocidade moderada. Os ensaios foram feitos em triplicata. O QUADRO 1 indica as condições adotadas nos ensaios.

QUADRO 1 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ADEQUADA.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP |
| Fração | $\geq 0,25 \mu\text{m}$ |
| Meio Filtrante | Papel filtro <i>Quanty</i> Faixa Branca |
| Tempo de agitação | 5 min |
| Velocidades | Lenta e Moderada |

FONTE: A autora (2021).

Após a quantificação do SMP das amostras foi realizado um teste-F e escolhida a velocidade que promoveu maior retirada de SMP da folha.

Estabelecida a velocidade de agitação foi, então, determinado o tempo ótimo de agitação. Para esse ensaio, as amostras de folhas foram agitadas na velocidade

escolhida anteriormente para três tempos diferentes. Os ensaios foram feitos em triplicata. O QUADRO 2 indica as condições adotadas nos ensaios. Após a quantificação do sMP das amostras, foi escolhido o tempo que transferiu mais sMP da folha para a água. Para os resultados do experimento de tempo foi realizada a análise de variância (ANOVA) e teste-F.

QUADRO 2 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE AGITAÇÃO.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP |
| Fração | $\geq 0,25 \mu\text{m}$ |
| Meio Filtrante | Papel filtro <i>Quanty</i> Faixa Branca |
| Tempos de agitação | 1, 3 e 5 min |
| Velocidades | Determinada anteriormente no ensaio de velocidade |

FONTE: A autora (2021).

Após a determinação da velocidade e do tempo ótimo por meio de agitação mecânica testou-se também a agitação manual para o tempo determinado anteriormente, conforme QUADRO 3. Para comparação dos resultados de agitação mecânica e manual foram realizados testes-F.

QUADRO 3 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE AGITAÇÃO MANUAL.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP |
| Fração | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meio Filtrante | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Tempo de agitação | Determinado anteriormente no ensaio de tempo |

FONTE: A autora (2021).

4.4.3.2 Estabelecimento da melhor técnica de filtração

Para avaliar a possibilidade de realizar a quantificação do sMP por filtração por profundidade e reduzir os custos da metodologia de quantificação de MP fitorremediado, foram realizados ensaios de filtração em profundidade utilizando discos de algodão e malha de nylon. Os ensaios foram feitos em triplicata e o QUADRO 4 indica as condições adotadas nestes.

QUADRO 4 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE ESTABELECIMENTO DA MELHOR TÉCNICA DE FILTRAÇÃO.

| | |
|---------------------------|--|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP |
| Frações | 8 a 53 μm , e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Descritos no QUADRO 5 |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempos de agitação | Determinada no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

Para a avaliação da possibilidade de utilizar a filtração em profundidade foram coletadas quatro amostras, denominadas de A1, A2, A3 e A4. Os meios filtrantes utilizados estão descritos no QUADRO 5.

QUADRO 5 - MEIO FILTRANTES UTILIZADOS NO ENSAIO DE ESTABELECIMENTO DA MELHOR TÉCNICA DE FILTRAÇÃO.

| Frações | Amostra A1 | Amostra A2 | Amostra A3 | Amostra A4 |
|------------------------|--|---|---|---|
| 8 a 53 μm | Papel filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul | Papel filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul | Papel filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul | Papel filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul |
| 0,45 a 8 μm | Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> | 5 discos de algodão | 10 discos de algodão | Malha de nylon |

FONTE: A autora (2021).

Os procedimentos de pesagem e secagem foram os mesmos descritos no item 4.4.1. Para análise e comparação os resultados obtidos foram submetidos a testes-F.

4.4.3.3 Seleção do solvente para obtenção do wMP

A maioria dos estudos de fitorremediação utilizam o clorofórmio para extrair o wMP da cera epicuticular (DZIERŻANOWSKI et al., 2011; HE; QIU; POTT, 2019); um estudo mostrou que o éter de petróleo pode ser utilizado como substituto (RAMOS; FILHO, 2017). A fim de determinar o melhor solvente a ser adotado nos experimentos de quantificação do wMP foram realizados testes para comparar resultados obtidos para os dois solventes. O tempo de agitação de 40 s da amostra imersa no solvente foi determinado com base na metodologia de estudos de fitorremediação de DZIERŻANOWSKI et al. (2011).

A metodologia foi realizada como descrito no item 4.4.2. O QUADRO 6 mostra os dados referentes ao ensaio. As análises foram feitas em triplicata e os resultados submetidos a testes-F.

QUADRO 6 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE SELEÇÃO DO SOLVENTE ORGÂNICO A SER UTILIZADO.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | wMP |
| Frações | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempo de agitação | Determinado no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

4.4.4 Avaliação da Fitorremediação de MP pela espécie *Ficus pumila* L.

4.4.4.1 Quantificação da cera epicuticular

A quantidade de cera produzida pelas plantas é um fator que influencia na quantidade de wMP retido, portanto, faz-se necessário determinar essa quantidade de cera por área foliar ($\mu g cm^{-2}$) presente na espécie estudada. As análises foram feitas em triplicata seguindo a metodologia descrita no item 4.4.2. O QUADRO 7 mostra os dados referentes ao ensaio.

QUADRO 7 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE QUANTIFICAÇÃO DE CERA.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | wMP |
| Frações | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempo de agitação | Determinado no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

4.4.4.2 Análise completa para as mesmas amostras

Para a mesma amostra foram quantificados o sMP e o wMP fitorremediado. Essa análise teve por objetivo quantificar o total de MP presente na amostra e comparar as quantidades de sMP e wMP que foi remediado para cada fração. As análises foram feitas em triplicata seguindo a metodologia descrita nos itens 4.4.1 e 4.4.2. O QUADRO 8 mostra os dados referentes ao ensaio.

4.4.4.3 Cinética de fitorremediação de MP

Esta análise teve por objetivo estabelecer a cinética de retenção do MP pela espécie escolhida em função da ausência de chuva. Objetivou-se determinar o

intervalo de dias consecutivos sem chuva em que a planta atinge sua capacidade máxima de retenção do poluente, ou seja, determinar o ponto de saturação do MP pelas espécies analisadas. Foram realizadas análises após 144, 178, 211 e 329 horas consecutivas sem chuva. As análises foram feitas em triplicata seguindo a metodologia descrita no item 4.4.1. O QUADRO 9 mostra os dados referentes ao ensaio.

QUADRO 8 - DADOS SOBRE O ENSAIO DA FITORREMEDIAÇÃO DE MP PELA ESPÉCIE SELECIONADA.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP e wMP |
| Frações | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempo de agitação | Determinado no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

QUADRO 9 - DADOS SOBRE O ENSAIO DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP |
| Frações | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempo de agitação | Determinado no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

4.4.4.4 Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes estações do ano

Para avaliar a sazonalidade do processo de fitorremediação foi realizada comparação da deposição do sMP para três estações diferentes, pois fatores climáticos como a umidade, por exemplo, podem interferir na retenção do poluente e esses fatores podem variar de acordo com a estação. Foram feitas três coletas de amostras, uma para cada estação, outono, inverno e primavera (devido ao fechamento do laboratório em decorrência das restrições impostas pela pandemia de COVID-19 não foi possível realizar análise no verão). A quantificação de sMP foi feita em triplicata, seguindo o mesmo procedimento descrito no item 4.4.1. O QUADRO 10 mostra os dados referentes ao ensaio. Os resultados obtidos foram realizados análise ANOVA e testes-F.

QUADRO 10 - DADOS SOBRE O ENSAIO EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1,5 a 2 m |
| MP analisado | sMP |
| Frações | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempo de agitação | Determinado no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

4.4.4.5 Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes faixas de altura

Neste experimento analisou-se a retenção do MP para duas faixas de alturas de parede verde. As alturas escolhidas representam a altura média para crianças de 5 anos e para adultos maiores de 18 anos. No Brasil, de acordo com o censo de 2008, a altura média de crianças de 5 anos é de 1,12 m, e para adultos maiores a média é de 1,70 m para homens e de 1,58 m para mulheres (IBGE, 2008), sendo 1,64 m a média entre os dois últimos valores.

Para esta análise foram coletadas amostras em duas faixas de altura em relação ao chão que contemplam as médias de alturas citadas anteriormente. As faixas de altura foram denominadas A1 e A2, estas compreendem as zonas da parede verde de 1 a 1,5 m e 1,5 a 2 m de altura, respectivamente, em relação ao chão. A quantificação foi feita em triplicata, seguindo o procedimento descrito no item 4.4.1. O QUADRO 11 mostra os dados referentes ao ensaio. Os resultados obtidos foram submetidos a testes-F.

QUADRO 11 - DADOS SOBRE O ENSAIO EM DIFERENTES FAIXAS DE ALTURA DA PAREDE VERDE.

| | |
|---------------------------|---|
| Altura em relação ao chão | 1 a 1,5 m (A1) e 1,5 a 2 m (A2) |
| MP analisado | sMP |
| Frações | 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm |
| Meios Filtrantes | Papel Filtro <i>Quanty</i> Faixa Azul, Papel Filtro <i>Whatman</i> GR 42 e Membrana filtrante PVDF <i>Millipore</i> |
| Velocidade | Determinada no item 4.4.3.1 |
| Tempo de agitação | Determinado no item 4.4.3.1 |

FONTE: A autora (2021).

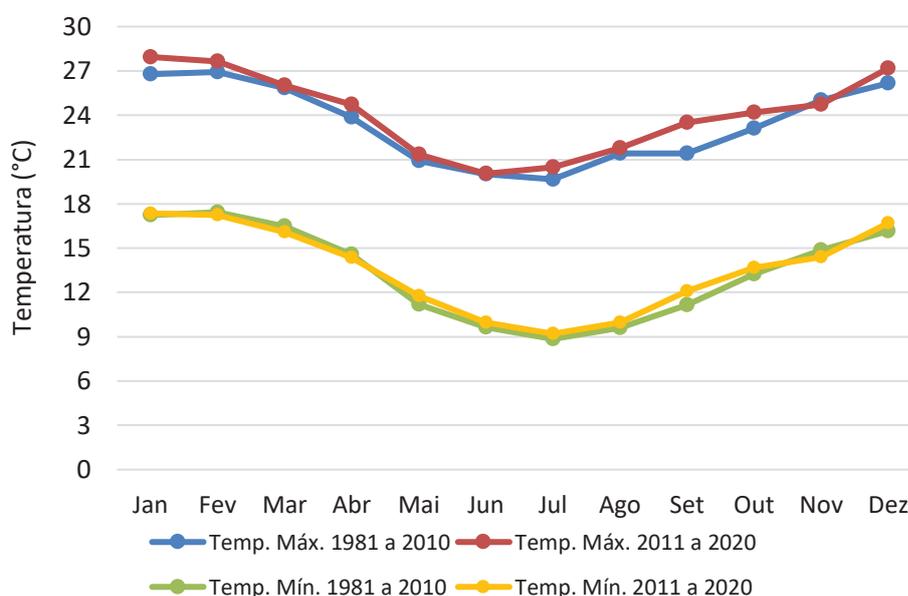
5 RESULTADOS

Para a cidade de Curitiba - PR, área de estudo desta pesquisa, foram avaliadas suas características climáticas e analisados possíveis pontos de coleta de folhas, a fim de se escolher o melhor sítio de estudo, de acordo com os critérios determinados na metodologia para a realização das análises.

5.1 CARACTERÍSTICA CLIMÁTICAS ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Curitiba, de acordo com KRÜGER; ROSSI, 2015; MENDONÇA; DUBREUIL (2005) é caracterizada como clima urbano-regional particular, pois forma uma ilha de frescor em relação às cidades vizinhas, devido ao efeito do relevo associado à dinâmica atmosférica. Isso leva à formação de ilhas de frio mesmo durante o verão. A temperatura varia bastante não apenas anualmente, de acordo com as estações, mas também durante o dia. Em Curitiba, as amplitudes térmicas diárias podem variar entre 0,5 e 25,7 °C, em geral, com temperaturas do ar mais elevadas do que a zona rural que a circunda. A FIGURA 7 ilustra as médias das temperaturas máximas e mínimas de Curitiba para os intervalos de 1981 a 2010 e 2011 a 2020.

FIGURA 7 - MÉDIAS DAS TEMPERATURAS MÍNIMAS E MÁXIMAS EM CURITIBA PARA OS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020.



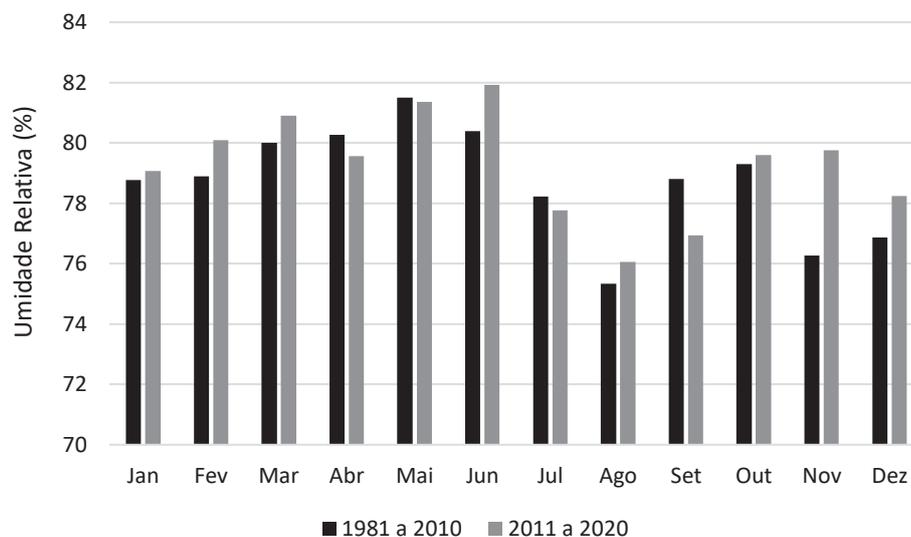
FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2021); INMET (2021).

Para os dois intervalos de tempo obtidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) os valores médios de temperatura foram similares. As médias das máximas se mantiveram entre 21 e 30 °C entre os meses de agosto e maio e em torno de 19 °C para os meses de junho e julho. As mínimas permanecem entre 18 e 12 °C nos meses de setembro a abril, e em torno de 10 °C nos meses de maio a agosto. Contudo, de acordo com KRÜGER e ROSSI (2015); MENDONÇA e DUBREUIL (2005), no verão as temperaturas absolutas podem chegar a 40 °C; e no inverno, por várias vezes, são registrados valores negativos de temperatura, sendo julho o mês mais frio, contudo as temperaturas permanecem reduzidas até meados da primavera.

O conhecimento das temperaturas médias é importante, pois esta influência na deposição do MP, considerando-se que temperaturas altas podem de forma indireta acelerar a velocidade do processo de deposição seca, favorecendo a fitorremediação. Temperaturas altas podem ser referentes não somente à temperatura da cidade como um todo, mas também referente a ilhas de calor que ocorrem em regiões com fluxos intensos de veículos. Como apontado por HE, QIU e POTT (2019) o armazenamento de calor causa um aumento do fluxo de ar para a área de alta temperatura fazendo com que a velocidade do vento seja maior, e, conseqüentemente, aumentando a deposição seca. Por apresentar médias de temperaturas baixas no inverno, principalmente nos meses de junho, julho e agosto, o mecanismo de deposição seca pode ser afetado e ter sua eficiência reduzida, contudo, como Curitiba mantém níveis de umidade relativa elevados durante todo o ano os mecanismos de fitorremediação, facilitados pela umidade, podem predominar nesse período. A FIGURA 8 mostra as médias mensais de umidade relativa (%), na cidade de Curitiba, para o mesmo intervalo de temperatura apresentado anteriormente na FIGURA 7.

Os valores de umidade permaneceram altos durante todo o ano, mesmo no mês de agosto, mês menos úmido, a umidade se manteve acima de 70%. De acordo com BECKETT, FREER-SMITH e TAYLOR (1998), a umidade é uma das variáveis que influenciam no tempo de residência das partículas na atmosfera, pois em condições de baixa umidade processos de lavagem e crescimento higroscópico (mecanismo no qual a partícula absorve umidade e aumenta de tamanho) terão sua eficácia comprometida reduzindo assim a quantidade de partículas que serão depositadas por deposição oculta ou como gotas de chuva.

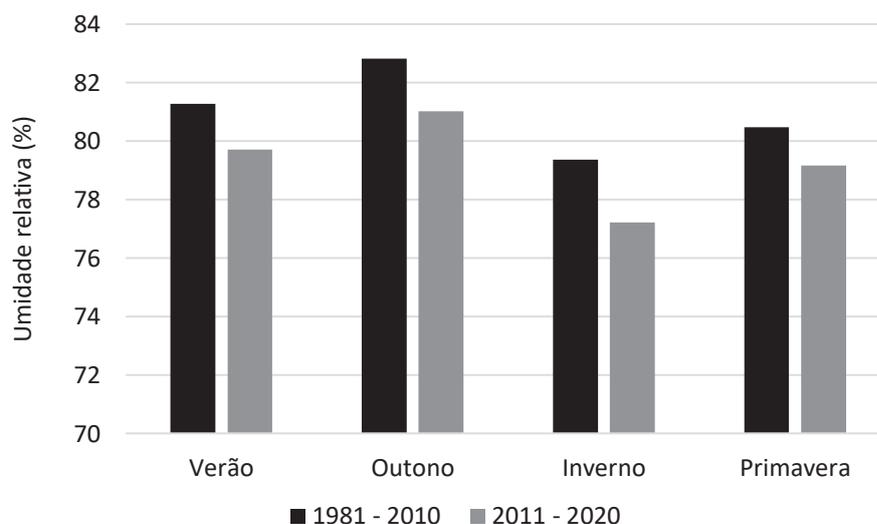
FIGURA 8 - MÉDIAS DOS VALORES DE UMIDADE RELATIVA EM CURITIBA PARA OS MESES NOS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020.



FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2021); INMET (2021).

A umidade relativa do ar na cidade quando analisada para as estações do ano mostra que o outono é a estação mais úmida, com valores próximos aos do verão. Como esperado a estação mais seca é o inverno, contudo como já citado anteriormente, mesmo na estação mais seca Curitiba mantém valores altos de umidade. Isso pode ser observado na FIGURA 9.

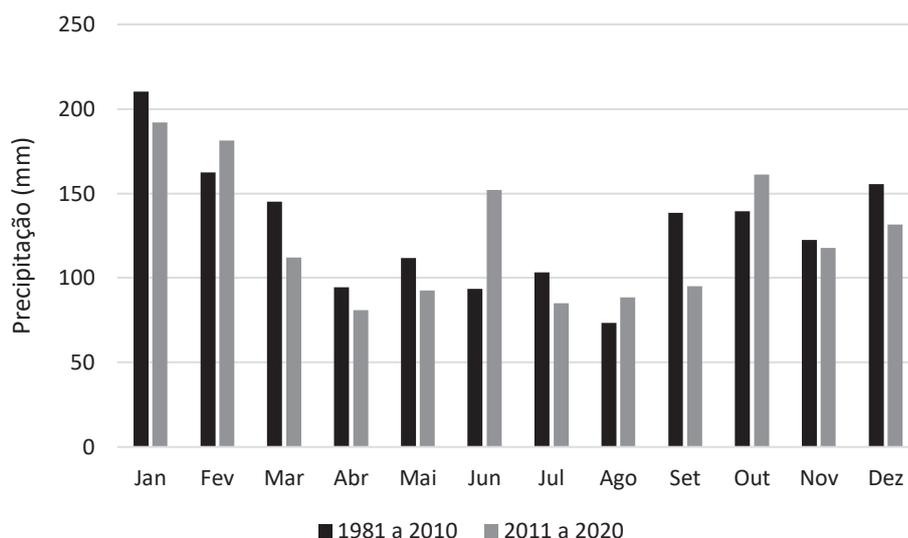
FIGURA 9 - MÉDIAS DOS VALORES DE UMIDADE RELATIVA EM CURITIBA PARA AS ESTAÇÕES DO ANO NOS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020.



FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2021); INMET (2021).

Com relação à precipitação, as médias mensais se mantiveram sempre acima de 80 mm, nos dois intervalos de tempo avaliados (FIGURA 10). Pode-se comparar com a cidade de Brasília, por exemplo, onde nos meses de maio a agosto a média de precipitação ficou abaixo de 30 mm (INMET, 2021).

FIGURA 10: MÉDIAS DOS VALORES DE PRECIPITAÇÃO EM CURITIBA PARA OS MESES NOS INTERVALOS DE 1981 A 2010 E 2011 A 2020.



FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2021); INMET (2021).

Os dados de umidade e precipitação para a Curitiba mostram que a cidade possui potencial para a fitorremediação do MP, visto que mesmo em meses com baixas temperaturas, nos quais processos de deposição que dependem de altas temperaturas para ter maior eficiência, como a deposição seca, ficam prejudicados, a cidade conta com níveis altos de umidade relativa e precipitação que farão com que a deposição das partículas seja facilitada por outros processos, como lavagem e crescimento higroscópico, por exemplo.

5.1.1 Sítio de estudo

A cidade de Curitiba possui várias regiões com alto tráfego de veículos e que permitiriam a obtenção de dados de fitorremediação de MP. O QUADRO 12 mostra

as informações sobre algumas ruas e avenidas na cidade que foram consideradas como possíveis sítios de estudo.

QUADRO 12 - RUAS E AVENIDAS CONSIDERADAS PARA ESCOLHA DO SÍTIO DE ESTUDO.

| Rua/Avenida | Extensão (m) | Tipo de Tráfego | Número de Pistas | Faixa exclusiva para ônibus | Dados de monitoramento | Facilidade de coleta |
|------------------------|--------------|---------------------|------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| João Gualberto | 2.000 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Não | Alta |
| Linha Verde | 22.000 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Sim | Média |
| Padre Anchieta | 3.100 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Sim | Média |
| Paraná | 5.160 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Sim | Alta |
| República Argentina | 5.700 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Não | Média |
| Sete de Setembro | 4.600 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Não | Alta |
| Visconde de Guarapuava | 5.100 | Automóveis e ônibus | 2 | Não | Sim | Média |
| Pres. Afonso Camargo | 6.300 | Automóveis e ônibus | 3 | Sim | Sim | Alta |

FONTE: Google Earth (2020); LACTEA (2020).

Das áreas de alto tráfego citadas no QUADRO 12 escolheu-se a Avenida Paraná como sítio de estudo, por atender aos seguintes critérios: região de tráfego intenso, carros e ônibus; facilidade alta para a coleta devido a sua proximidade com os laboratórios onde foram feitas as análises; presença de uma estação de monitoramento da poluição do ar próxima; presença de no mínimo duas paredes verdes.

Localizada na região nordeste da cidade, a Avenida Paraná possui extensão de 5.160 m, dividida em três pistas, sendo a central uma via exclusiva de ônibus. A Avenida inicia no bairro Cabral, como continuação da Avenida João Gualberto e termina no bairro Santa Cândida quando passa a ser denominada Estrada de Colombo (PR-417), que liga Curitiba à cidade de Colombo. Na FIGURA 11 é possível observar a localização da Avenida no município de Curitiba.

FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DA AVENIDA PARANÁ NO MUNICÍPIO DE CURITIBA.



FONTE: Adaptado de IBGE (2021); IPPUC (2021).

5.1.1.1 Tráfego da Avenida Paraná

Os últimos dados de contagem de tráfego realizada pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPUCC), em 2015 para uma segunda-feira, mostram a média horária de automóveis e ônibus que trafegam na Avenida nos horários de pico, das 6h30 às 9h30 e das 16h30 às 19h30. Os dados foram coletados entre as esquinas das ruas Estados Unidos e Flávio Dallegrove. Na FIGURA 12, é possível observar os quatro fluxos para os quais foram coletados dados, sendo os fluxos 1 e 2 sentido bairro Cabral e fluxos 3 e 4 sentido bairro Boa Vista.

Na TABELA 3 estão apresentados os dados para os quatro fluxos.

TABELA 3 - MÉDIA HORÁRIA DE AUTOMÓVEIS E ÔNIBUS NA AVENIDA PARANÁ.

| | Automóveis | | Ônibus | |
|----------------|------------|---------|---------|---------|
| | Fluxo 1 | Fluxo 4 | Fluxo 2 | Fluxo 3 |
| 06h30 às 9h30 | 255 | 90 | 21 | 23 |
| 16h30 às 19h30 | 128 | 441 | 23 | 25 |

FONTE: IPUCC (2015).

FIGURA 12 - FLUXOS DE TRÁFEGO NA AVENIDA PARANÁ.



FONTE: IPUCC (2015).

Dados de contagem de tráfego para as Avenidas João Gualberto, Sete de Setembro e República Argentina mostram que essas avenidas possuem médias horárias de automóveis e ônibus maiores se comparadas com as da Avenida Paraná (IPUCC, 2015). A Avenida República Argentina, por exemplo, chega a ter valores de 803 veículos, por hora, para o intervalo das 16h30 às 19h30 em uma de suas pistas. Por terem fluxos de automóveis e ônibus mais intensos poderiam ser sítios de estudos mais promissores para a realização do trabalho, contudo estas não dispõem de estações de monitoramento da qualidade do ar próximas.

É importante ressaltar que esses dados de contagem de tráfego possivelmente estão defasados, visto que foram medidos em 2015, porém foram os únicos dados disponíveis para os locais considerados até a finalização deste estudo.

5.1.2 Espécies e pontos de coleta avaliados

Na Avenida Paraná foram avaliados 11 possíveis pontos de coleta. Das espécies elencadas com potencial para estudo neste trabalho, *Hedera helix*, *Hedera caucasigen*, *Senecio macroglossus*, *Ficus pumila* L., *Parthenocissus tricuspidata*, *Buxus sempervirens*, *Cycas revoluta*, *Platyclusus orientalis*, *Liquidambar styraciflua* e *Jacaranda mimosifolia*, apenas a *Ficus pumila* L. foi encontrada no sítio de estudo. A

informação sobre os pontos avaliados e as espécies encontradas nestes estão mostrados no QUADRO 13.

QUADRO 13 - IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES E POSSÍVEIS PONTOS PARA COLETA DE AMOSTRAS NA AVENIDA PARANÁ.

| Ponto- | Espécie | Vantagem | Desvantagem |
|--|--|--|--|
| 1  | <i>Ficus pumila</i> L. | Parede verde, duas espécies plantadas no mesmo local. | - |
| 2  | <i>Ficus pumila</i> L. | Parede verde com parte orientada para Avenida, próxima às fontes de emissão. | A maior parte da área coberta por plantas encontra-se transversal à Av. Paraná, diminuindo a área passível de coleta. |
| 3  | <i>Schefflera arboricola</i> | Parede verde orientada para Avenida, próxima às fontes de emissão | Área plantada pequena. Limitação para amostragem em alturas diferentes. |
| 5  | <i>Ligustrum lucidum</i> e <i>Artocarpus heterophyllus</i> | Espécies plantadas diretamente na calçada, proximidade às fontes de emissão. | Espécies de cultivo menos viável, ocupa mais espaço se comparada a uma parede verde. |
| 5  | <i>Ligustrum lucidum</i> | Espécie plantada diretamente na calçada, proximidade às fontes de emissão. | Localizada próxima a esquina, porém em rua transversal à Av. Paraná. Espécie de cultivo menos viável, ocupa mais espaço se comparada a uma parede verde. |
| 6  | <i>Ligustrum lucidum</i> | Espécie plantada diretamente na calçada, proximidade às fontes de emissão. | Espécie de cultivo menos viável, ocupa mais espaço se comparada a uma parede verde. |

Continua ...

Continuação

QUADRO 14 - IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES E POSSÍVEIS PONTOS PARA COLETA DE AMOSTRAS NA AVENIDA PARANÁ.

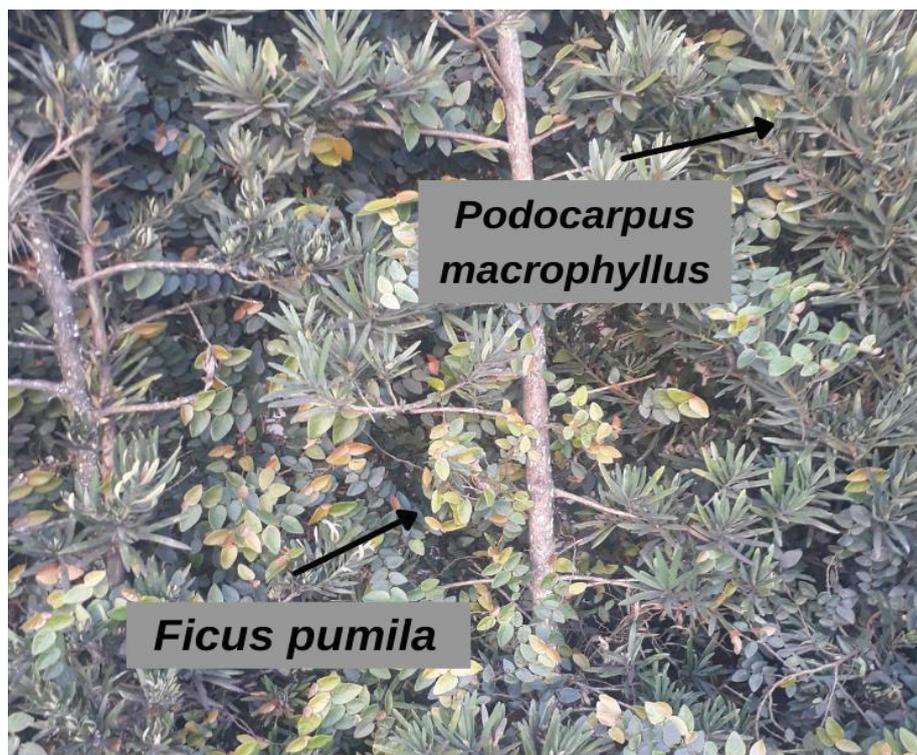
| Ponto- | Espécie | Vantagem | Desvantagem |
|---|---|---|---|
| 7  | <i>Euphorbia milii</i> | Espécie plantada em muro diretamente, orientado para Avenida, próxima às fontes de emissão. | Planta de porte pequeno com pouca quantidade de folhas, limitação para amostragem em diferentes alturas e amostragens frequentes e em grande quantidade. |
| 8  | <i>Senna macranthera</i> | Várias espécies plantadas dentro de residência, próximo a calçada e fontes de emissão. | Dificuldade para coletas de amostras (necessidade de entrar na residência). |
| 9  | <i>Lafoensia vandelliana</i> Cham e Schltl | Espécie plantada diretamente na calçada, proximidade às fontes de emissão. | Espécie de cultivo menos viável, ocupa mais espaço se comparada a uma parede verde. |
| 10  | <i>Duranta erecta aurea</i> | Espécie plantada diretamente na calçada, proximidade às fontes de emissão. | Planta de porte pequeno, limitação para amostragem em alturas diferentes. |
| 11  | <i>Spiraea cantoniensis</i> , <i>Koelreuteria paniculata</i> | Planta ocupa pouco espaço no solo. | O ponto não está localizado diretamente na Av. Paraná, mas em uma rua transversal. Planta de porte pequeno e com pouca quantidade de folhas, limitação para amostragem em diferentes alturas e amostragens frequentes e em grande quantidade. |

FONTE: A autora (2020); Google Earth (2020).

Após análise das vantagens e desvantagens de cada ponto foi escolhido o ponto P1, neste estão plantadas, na mesma parede verde, a espécie *Ficus pumila* L.

(trepadeira, popularmente conhecida como unha de gato) e a espécie *Podocarpus macrophyllus* (arbusto, popularmente conhecido como pinheiro budista). Elas podem ser vistas na FIGURA 13.

FIGURA 13 - FICUS PUMILA L. E PODOCARPUS MACROPHYLLUS, PLANTADAS NO PONTO DE COLETA P1.

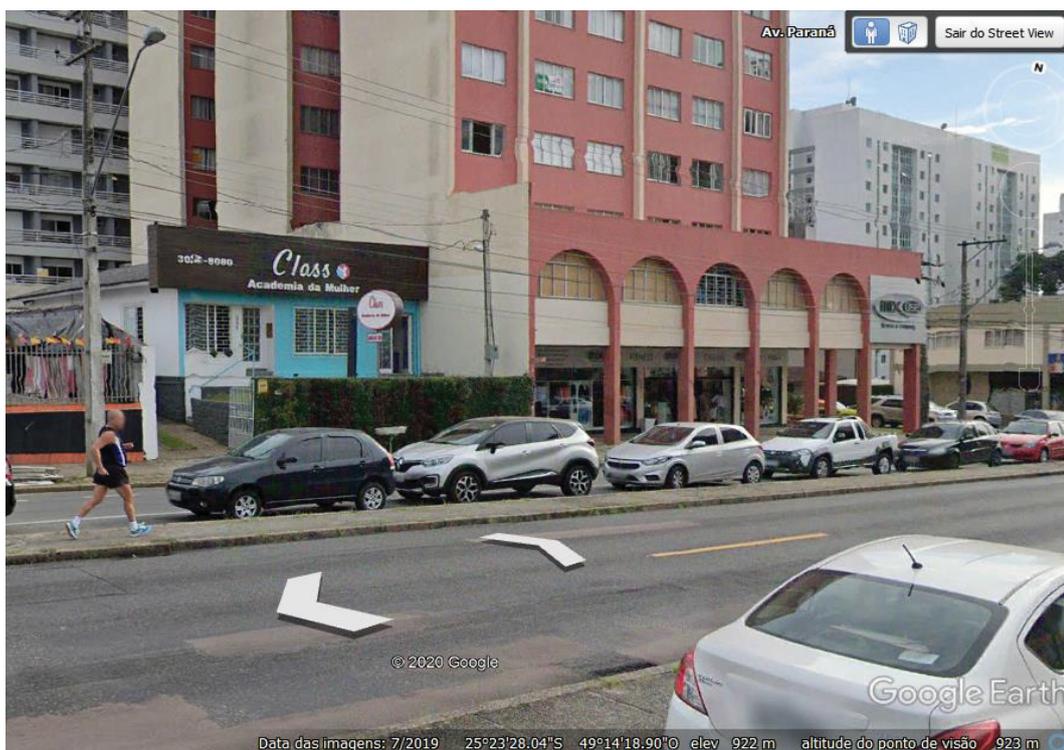


FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 14 é possível ver o ponto de coleta P1, sua distância em relação à rua. A parede fica a 2,99 m da faixa para automóveis em geral, e a 11,46 m da faixa exclusiva para ônibus. Destaca-se também que esta parede é próxima ao Terminal Boa Vista, aproximadamente 360 m, local que possui intenso tráfego de ônibus para além daqueles que trafegam na Avenida Paraná. A FIGURA 15 mostra a parede verde mais de perto.

A parede pertence ao estabelecimento *Class Academia da Mulher*, que autorizou a coleta de amostras de folhas para a realização desta pesquisa, conforme solicitação oficial da UFPR (ofício disponível no APÊNDICE I).

FIGURA 14 - VISTA DO PONTO DE COLETA P1 E DA AVENIDA PARANÁ.



FONTE: Google Earth (2020).

FIGURA 15 - PONTO DE COLETA P1.



FONTE: A autora (2020).

5.1.2.1 Espécies presentes na parede verde

A *Ficus pumila* L., popularmente conhecida como Unha-de-Gato, é uma espécie de planta do gênero *Ficus* que pertence à família *Moraceae*. É uma espécie perene, que não perde suas folhas, portanto, tem condições de fitorremediar o poluente ao longo do ano todo. Ela é amplamente cultivada na cidade de Curitiba, em muros e paredes, tanto de residências quanto de pontos comerciais.

De acordo com FERRER-GALLEGO, BOISSET e JARVIS (2015) o gênero *Ficus* L. é um dos maiores gêneros de plantas vasculares com cerca de 750 a 1000 espécies bem distribuídas em zonas tropicais e subtropicais. Além disso, as espécies do gênero têm uma grande variedade de formas de vida (árvores, arbustos, vinhas, hemiepífitas, estranguladores, trepadeiras) e servem como recurso importante para pássaros frugívoros e mamíferos em florestas tropicais. Segundo BAI et al. (2019) a espécie também tem sido utilizada para fins medicinais pelos chineses para os tratamentos diuréticos, revigorar a circulação do sangue e desintoxicar.

De acordo com GILMAN (1999), a *Ficus pumila* L. não precisa de suporte para aderir a uma parede e apresenta um crescimento rápido e denso de folhas pequenas, verde-escuras e sobrepostas em caules finos, com aproximadamente dois anos de idade, folhas maiores se desenvolvem em caules moderadamente grossos e peludos. A planta é morfológicamente diferente em suas fases juvenil e adulta. Quando juvenil suas folhas tem em torno de 1,5 a 2,5 cm de comprimento, com formatos ovadas ou oblongas, muito espaçadas. Já quando adulta suas folhas podem ter de 4 a 7 cm de comprimento e de 2,2 a 4 cm de largura, formatos oblongas, oblanceoladas, ovadas ou elípticas. Sua superfície superior é verde escura, ligeiramente brilhante, com a venação (nervuras) notavelmente mais clara, já a superfície inferior é verde clara, sem brilho, com venação reticulada proeminente. Seus pecíolos tem de 1,3 a 1,6 cm de comprimento (CABI, 2021).

A espécie não requer cuidados para que cresça, e seus ramos aderem vigorosamente ao suporte fornecido, basta apenas que este seja adequado (PATRO, 2014)**Erro! A referência de hiperlink não é válida.** Essas características tornam a espécie conveniente ao uso em centros urbanos com baixa disponibilidade de espaço. Para além dos benefícios ambientais, o uso de paredes verdes com *Ficus pumila* L. também contribuem positivamente para a paisagem da cidade e desincentivam

práticas como a pichação. Todos esses fatores positivos fazem com que a espécie possa ser facilmente aceita pela população em geral.

O pinheiro budista, forma como a espécie *Podocarpus macrophyllus* é popularmente conhecida, pertence à família *Podocarpaceae*, e tem sido cultivada e plantada como uma árvore de jardim ou em vasos em áreas tropicais e subtropicais, sendo amplamente utilizada de forma ornamental, principalmente para paisagismo, pois tem um alto valor estético (WEI; REN; ZHOU, 2013).

De acordo com LI et al. (2016), o gênero *Podocarpus*, ao qual a espécie pertence, é um grande grupo de árvores que possui cerca de 100 espécies diferentes, é uma gimnosperma que cresce em partes da Ásia Oriental e no hemisfério sul, com 13 espécies e três variantes sendo endêmicas para a China. Este gênero consiste em importantes árvores madeireiras usadas por muitas comunidades tradicionais como remédio para o tratamento de febre, asma, tosse, cólera, cinomose, dores no peito e doenças venéreas.

Essa espécie, apesar de menos comum na cidade de Curitiba, se comparada a *Ficus pumila* L., possui condições para o cultivo na cidade. De acordo com PATRO (2014), ela é capaz de tolerar baixos períodos de estiagem e geadas leves, além de ser indicada para o plantio em muros e paredes. Da mesma forma que a *Ficus pumila* L., devido a suas características e seu uso em projetos de paisagismo a *Podocarpus macrophyllus* mostra-se com uma opção viável para o cultivo em centros urbanos. Apesar da presença das duas espécies na parede verde, neste trabalho foi escolhida apenas a *Ficus pumila* L. para as análises.

5.1.2.2 Identificação das estações de monitoramento

A metodologia do projeto *CWBreath*, realizado pelo LACTEA, consiste em utilizar sensores de baixo custo acoplados em microcontroladores que transmitem as informações para um servidor na UFPR que armazena os dados. Para o ponto de coleta escolhido foram identificadas as duas estações mais próximas, são elas: Estação Boa Vista e Estação Mercês. Preferencialmente, foram utilizados os dados da Estação Boa Vista por ser a mais próxima, em caso de indisponibilidade de dados desta foram utilizados então dados da estação Mercês. O QUADRO 14 mostra informações sobre as estações de monitoramento.

QUADRO 15 - INFORMAÇÕES SOBRE A ESTAÇÃO BOA VISTA E ESTAÇÃO MERCÊS.

| Estação Boa Vista e Estação Mercês | | |
|---|---|--|
| Coordenada (SIRGAS 2000) | -25.390575, -49.254514 | -25.425985, -49.287201 |
| Topografia/altitude | 950 m | 940 m |
| Endereço | Rua Leão Sallum, 1394 | Rua Desembargador Motta, 3428 |
| Característica do solo no entorno (20 m) | Pavimentada e grama | Pavimentada e grama |
| Vias relevantes mais próximas | Av. Paraná, Av. Anita Garibaldi, Rua Jovino do Rosário, Rua Holanda | Av. Manoel Ribas, Rua Júlia Wanderley, Rua Padre Agostinho, Rua Padre Anchieta, Rua Desembargador Motta, Rua Brigadeiro Franco |
| Principais fontes (industriais e/ou móveis) | Veiculares | Veiculares |
| Parâmetros medidos | MP _{2,5} , MP ₁₀ , Umidade e Temperatura | MP _{2,5} , MP ₁₀ , Umidade e Temperatura |
| Tipo de monitoramento | Automático | Automático |
| Escala espacial | Bairro | Bairro |
| Frequência do monitoramento | Contínuo | Contínuo |

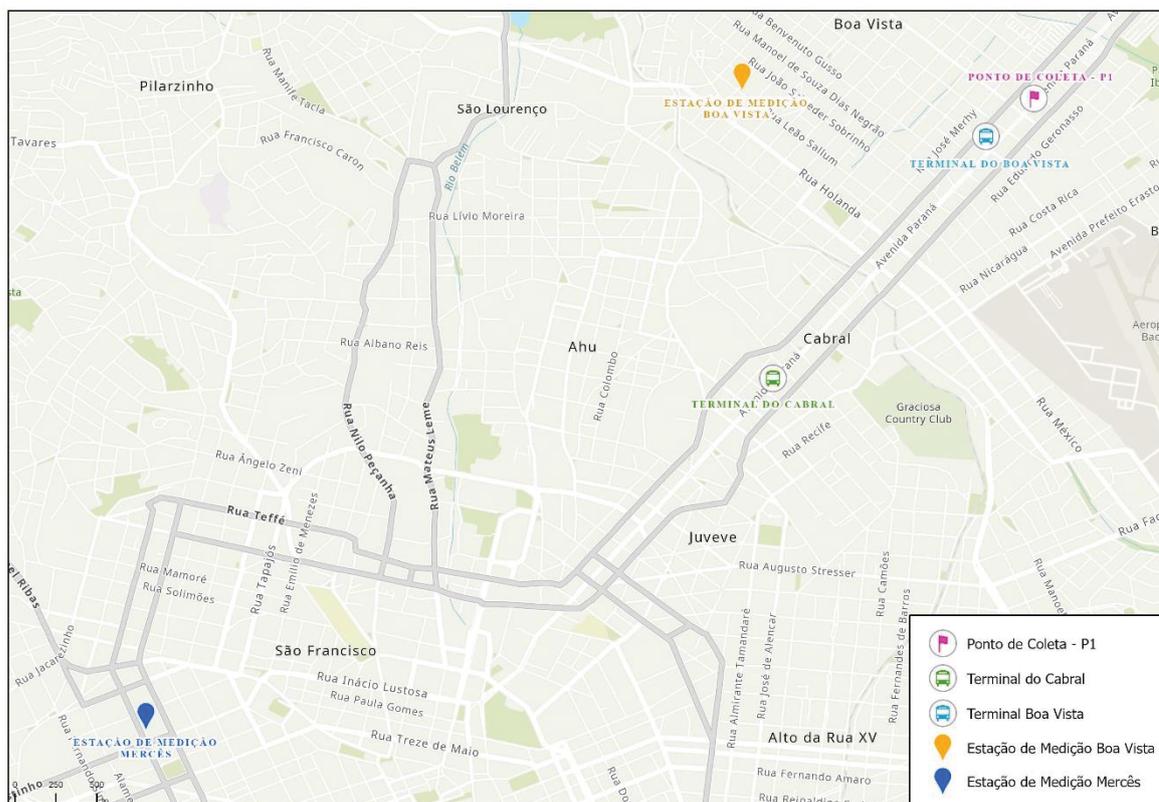
FONTE: Adaptado de LACTEA (2020).

Na FIGURA 16 é possível visualizar no mapa a disposição espacial dos elementos de interesse para este estudo. Estão representados os Terminais do Cabral e o Terminal do Boa Vista, separados por 1.800 m. O ponto de coleta P1 está representado pelo símbolo rosa, e o marcador em amarelo indica a localização da estação de medição da rede de monitoramento do LACTEA/UFPR, denominada Estação Boa Vista, esta é a mais próxima ao ponto de coleta escolhido. O ponto P1 encontra-se a 1.600 m de distância (em linha reta) da estação Boa Vista. O marcador azul indica a localização da Estação Mercês, segunda estação mais próxima do ponto de coleta P1 (6.250 m), dados desta foram usados quando houve falhas no monitoramento da Estação Boa Vista.

É importante ressaltar que as concentrações de MP no ar durante o ano de 2021 podem ser menores, se comparadas a outros anos, devido a pandemia de COVID-19 quando muitas atividades foram desenvolvidas de forma remota, dessa forma reduzindo a quantidade de veículos que trafegaram no local. A rede de

monitoramento não dispõe de dados anteriores a 2020 para que diferença seja mensurada.

FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE COLETA P1, TERMINAIS CABRAL E BOA VISTA E DA ESTAÇÃO DE MEDIDA BOA VISTA E MERCÊS.



FONTE: A autora (2022).

5.2 DETERMINAÇÃO DA METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DE MP FITORREMEDIADO

Devido à falta de metodologia bem firmada para a quantificação do MP foram realizados testes preliminares para determinação do tempo e velocidade de agitação das amostras, escolha do solvente e testes de outros materiais para a filtração, este último com objetivo de baratear a metodologia, que foram utilizados nas análises subsequentes. Todas os procedimentos laboratoriais ocorreram no período de abril a novembro de 2021 e foram realizados no laboratório LCPQ da UFPR.

Para todas as coletas foi considerado um intervalo, de dias consecutivos sem chuva, prévio; dentro deste intervalo foram desconsideradas todas as chuvas registradas, se a soma destas foi menor ou igual a 1 mm. Estudos conduzidos por

ZHANG (2019) nos quais foram simuladas diferentes intensidades de chuva, a fim de testar a remoção do MP das folhas de cinco espécies de planta (*Pinus tabuliformis*, *Platanus acerifolia*, *Euonymus japonicus*, *Populus tomentosa* e *Sophora japonica*) mostraram que chuvas de até 20 mm.h^{-1} retiram em torno de 40% de MP de diversas frações da folha (e até 60% para as espécies *Euonymus japonicus* e *Populus tomentosa*, especificamente para a fração $\text{MP}_{2,5-10}$). Portanto, considerou-se que a remoção de poluente promovida por apenas 1 mm de chuva distribuído ao longo de alguns dias não influenciou ou teve influência desprezível nos resultados deste trabalho.

A quantificação de MP nas amostras de *Ficus pumila* L. foram realizadas no dia da coleta ou no dia seguinte. Para períodos, principalmente em dias com umidade relativa do ar mais baixa, as folhas armazenadas enrolam e esta alteração de formato pode dificultar o processo de retirada do MP pela água e alterar o valor da área foliar, pois sua alteração de formato torna mais difícil fotografar a amostra.

Para o cálculo da área foliar, as folhas da amostra foram dispostas uma por uma sobre a bancada, após a agitação para extração do MP, e fotografadas como demonstrado no FIGURA 17, após isso as fotos foram processadas pelo *software ImageJ* (RASBAND, W.S).

FIGURA 17 - FOLHAS DAS AMOSTRAS DISPOSTAS SOBRE A BANCADA.



FONTE: A autora (2021).

Devido aos materiais que foram viabilizados para este estudo, peneira de 53 μm , Papel filtro *Quanty* Faixa Azul - retenção de 8 μm , Papel Filtro *Whatman* GR 42 - retenção de 2,5 μm e Membrana filtrante PVDF Millipore - retenção de 2,5 μm ; as frações de MP analisadas serão denominadas da seguinte forma: MP₅₃, MP₈ e MP_{2,5} que compreendem a fração de partículas cujo diâmetro varia de 8 a 53 μm , 2,5 a 8 μm e 0,45 a 2,5 μm , respectivamente.

As tabelas com dados de precipitação para os intervalos sem chuvas considerados pré-coleta estão apresentadas no ANEXO I.

5.2.1 Determinação da velocidade adequada e tempo ótimo de agitação

As amostras foram coletadas no ponto P1, no dia 13 de abril de 2021 às 8 horas da manhã após 218 horas (aproximadamente 9 dias) sem chuvas (CEMADEN, 2021); estas serviram para determinar a velocidade e tempo de agitação das folhas em água para a maior remoção de MP.

As análises seguiram a metodologia descrita no item 4.4.1, foi quantificado apenas sMP e todas as amostras foram agitadas por 5 min (HE; QIU; POTT, 2019). A TABELA 4 mostra os resultados dos ensaios de agitação em velocidade lenta e moderada, bem como os resultados do teste-F realizado.

TABELA 4 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE VELOCIDADE.

| Velocidade | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância | Teste F |
|------------|---|---|-----------|--------------------------------|
| Lenta | 34,7011 | 23,0324 \pm 11,0043 | 181,6425 | p = 0,3714 F = 1,6924 |
| | 26,1157 | | | |
| | 8,2805 | | | |
| Moderada | 13,8609 | 19,5691 \pm 14,3158 | 307,4146 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 5,6012 | | | |
| | 39,2451 | | | |

FONTE: A autora (2021).

O teste F não apontou haver diferença significativa entre os dois grupos, $p > 0,05$, portanto, escolheu-se a velocidade lenta que promoveu, em média, maior

remoção do MP, 17,7% a mais; essa velocidade foi adotada para todos os experimentos posteriores feitos neste trabalho. É importante ressaltar que o MP, de acordo com SOUZA; MELLO (2010), pode ter em sua composição substâncias solúveis em água como, por exemplo, íons NH_4^+ e SO_4^{2-} , sendo assim, os valores obtidos neste estudo podem estar subestimados em relação à quantidade real de MP fitorremediado na folha da planta.

Para determinar o tempo ótimo de agitação as amostras foram agitadas em 3 tempos diferentes, 1, 3 e 5 min, na velocidade lenta. Os resultados obtidos estão mostrados nas TABELA 5.

TABELA 5 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE TEMPO DE AGITAÇÃO.

| Tempo de agitação | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância | ANOVA |
|-------------------|---|--|-----------|--|
| 1 min | 34,3314 | 36,8499± 2,2078 | 4,8742 | p = 0,0006 F = 32,2144 F _{crítico} = 5,1433 |
| | 37,7670 | | | |
| | 38,4512 | | | |
| 3 min | 18,7258 | 21,9558± 2,9300 | 8,5847 | |
| | 22,6991 | | | |
| | 24,4425 | | | |
| 5 min | 26,1157 | 26,8686± 1,6227 | 2,6331 | |
| | 28,7310 | | | |
| | 25,7591 | | | |

FONTE: A autora (2021).

Os resultados obtidos nos experimentos de tempo de agitação foram submetidos a teste de análise de variância (ANOVA). Este teste resultou num p-valor <0,05 indicando que havia diferença significativa entre as amostras. Após isso, realizou-se testes-F (análise de variância para dois grupos) para cada par de amostras de tempo; infelizmente estes não resultaram em diferença significativa e, portanto, não foi possível indicar o grupo diferente. Escolheu-se como tempo a ser adotado no trabalho o tempo de 1 min, pois este promoveu, em média, maior remoção do MP.

Após análises dos resultados de agitação foi verificada a melhor forma de agitação, mecânica ou manual, pois 1 min é um período curto de tempo e permite uma

agitação lenta e vigorosa, mesmo de forma manual, o que torna este tipo de agitação viável.

Como os trabalhos sobre fitorremediação não explicitam o tipo de agitação que foi feita, assume-se que seja agitação manual, uma vez que nenhum equipamento é mencionado, portanto, neste trabalho optou-se por testar dois tipos de agitação: mecânica e manual. Para a agitação mecânica utilizou-se um *shaker* Banho Dubnoff SL – 157, capaz de promover uma agitação mais uniforme e constante em termos de velocidade. Os resultados deste ensaio foram comparados com os resultados de amostras agitadas manualmente.

Na TABELA 6 estão mostrados os resultados obtidos para a agitação mecânica e manual para três faixas de retenção de MP (0,45 a 2,5 μm , 2,5 a 8 μm e 8 a 53 μm), as amostras foram coletadas às 8 horas do dia 25 de agosto de 2021 após intervalo de 211 horas (aproximadamente nove dias) consecutivas sem chuva.

Os testes-F realizados não apontaram haver diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os resultados obtidos para agitação mecânica e manual, contudo, a média de MP retirado das folhas pelo uso da agitação manual foi maior para as três frações estudadas, 17,18, 99,60 e 135,86% a mais, da menor para a maior, respectivamente. Nota-se que para as frações de 2,5 a 8 μm e 8 a 53 μm os resultados de MP retirado por agitação manual foram maiores que o dobro dos obtidos por agitação mecânica.

A agitação pelo equipamento aconteceu em movimentos horizontais apenas em uma direção, em velocidade lenta como determinada em experimentos anteriores, já a manual foi realizada de forma que a amostra fosse agitada com movimentos circulares. Contudo para o método manual, não é possível garantir que todas as amostras sejam agitadas sob a mesma velocidade.

Os resultados obtidos para estes experimentos são satisfatórios em termos de redução de custos da metodologia, pois a agitação manual dispensa a necessidade de equipamentos adicionais tornando a mais acessível e simples.

5.2.2 Estabelecimento da melhor técnica de filtração

Neste ensaio foram testados três tipos de meio filtrante, membrana *millipore*, algodão e nylon. Dois tipos básicos de processos de filtração podem ser usados para a retenção do MP: no primeiro, as partículas em suspensão são depositadas na superfície de um meio poroso que oferecem apenas pequena resistência ao fluxo, e,

conforme as partículas sólidas se acumulam, elas formam efetivamente uma camada filtrante que auxilia no processo.

TABELA 6 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE COMPARAÇÃO ENTRE AGITAÇÃO MECÂNICA E MANUAL.

| Agitação | MP ($\mu\text{g cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g cm}^{-2}$) | Variância | Teste F |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------|--------------------------------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | |
| Mecânica | 0,6605 | 0,7194 \pm 0,0663 | 0,0044 | p = 10,6271 F = 0,0941 |
| | 0,7065 | | | |
| | 0,7913 | | | |
| Manual | 0,7139 | 0,8430 \pm 0,2163 | 0,0468 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 1,0927 | | | |
| | 0,7224 | | | |
| 2,5 a 8 μm | | | | |
| Mecânica | 5,7762 | 6,7379 \pm 1,1838 | 1,4013 | p = 0,1616 F = 5,1895 |
| | 6,3775 | | | |
| | 8,0600 | | | |
| Manual | 14,3607 | 13,4487 \pm 2,6966 | 7,2719 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 15,5711 | | | |
| | 10,4143 | | | |
| 8 a 53 μm | | | | |
| Mecânica | 18,3679 | 18,6270 \pm 1,4420 | 2,0795 | p = 0,0753 F = 12,2752 |
| | 20,1809 | | | |
| | 17,3320 | | | |
| Manual | 44,8680 | 43,9007 \pm 5,0523 | 25,5261 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 38,4347 | | | |
| | 48,3995 | | | |

FONTE: A autora (2021).

No segundo tipo, chamada de filtração em profundidade, as partículas penetram nos poros do meio filtrante, onde o impacto entre as partículas e a superfície do meio filtrante é responsável por sua remoção e retenção. Este tipo é comumente utilizado para a remoção de partículas finas em suspensão e para casos nos quais a recuperação das partículas não é necessária (COULSON et al., 2002).

As amostras foram coletadas no dia 06 de maio de 2021 após 156 horas (aproximadamente 7 dias) consecutivas sem chuva (CEMADEN, 2021) no ponto de coleta P1. As análises seguiram a metodologia descrita no item 4.4.1, para sMP e foram analisadas apenas duas frações de MP (0,45 e 8 μm e 8 a 53 μm) a fim de poupar filtros.

Para meio filtrante de nylon (A4) não ocorreu a retenção de MP, ou seja, não foi possível quantificar o MP fitorremediado pela *Ficus pumila* L. A utilização de algodão com 40.000 μm de altura (A3) foi descartado devido à dificuldade de manipulação, especialmente em relação à secagem, pois este precisou de mais de 12 horas de secagem em estufa exigindo mais tempo de utilização do equipamento e gasto energético. Devido a isto, os ensaios com algodão com 40.000 μm de altura não foram realizados.

Os resultados obtidos para os experimentos com a membrana *millipore* (A1) e para o algodão 20.000 μm de altura (A2) estão dispostos na TABELA 7.

TABELA 7 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE DETERMINAÇÃO DA METODOLOGIA DE FILTRAÇÃO.

| Meio Filtrante | MP ($\mu\text{g.cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g.cm}^{-2}$) | Variância | Teste F |
|--|------------------------------|------------------------------------|-----------|---------------------------------|
| Membrana filtrante 0,45 μm | 1,1839 | 1,4096 \pm 0,5188 | 0,2691 | p = 0,0002 F = 4517,1360 |
| | 1,0419 | | | |
| | 2,0030 | | | |
| Algodão (altura de 0,02 m) | 60,6135 | 35,9588 \pm 34,86708 | 1215,7134 | F _{crítico} = 18,5128 |
| | 11,3040 | | | |

FONTE: A autora (2021).

Um conjunto de algodão de 20.000 μm de altura (A2) também foi descartado devido à dificuldade de manipulação e a incerteza do resultado obtido. Os dois

conjuntos restantes apresentaram ampla oscilação na massa de MP. Os valores obtidos não só variaram entre si para o mesmo método de filtração, mas também apresentaram alta variação em relação aos resultados obtidos com a membrana filtrante de 0,45 μm . Apesar de neste teste o diâmetro da fração analisada variar de 0,45 a 8 μm , e, portanto, ser uma faixa maior de variação de diâmetro, se comparado à soma das duas menores frações para os valores obtidos no experimento de agitação mecânica e manual (7,4573 e 14,2917 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) é possível ver que o valor médio obtido de 35,9588 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ é muito maior que o esperado.

O teste-F mostrou que há diferença significativa entre os dois grupos ($p < 0,05$) e as amostras filtradas como conjunto de algodão A2 apresentou valor muito grande para a variância, muito maior que a quantidade de MP, diante disto, não é seguro afirmar se os valores obtidos nos experimentos são valores que representam a quantidade real de poluente retido, ou se estes carregam erros de pesagem devido à característica do material e os problemas de manuseio previamente citados. Portanto, os resultados obtidos demonstram que o algodão não pode ser adotado para a filtração em profundidade para a quantificação de MP fitorremediado em folhas.

5.2.3 Seleção do solvente

O éter de petróleo foi apontado na literatura como possível substituto para o clorofórmio. Neste trabalho testou-se a sua eficiência em remover a cera das folhas como tentativa de redução de custo da metodologia uma vez que o primeiro é mais barato. O litro do éter custa em torno de US\$ 15,99, já o do clorofórmio US\$ 42,95.

As amostras foram coletadas no ponto P1 às 8 horas do dia 25 de setembro de 2021, após um intervalo de 114 horas consecutivas (aproximadamente cinco dias) sem chuva (CEMADEN, 2021). As análises seguiram a metodologia descrita no item 4.4.2 para a quantificação do $w\text{MP}$, e para tal foram utilizados dois solventes orgânicos: clorofórmio e éter de petróleo; todas as amostras foram agitadas de forma manual por 40 s. Os resultados de $w\text{MP}$ obtidos estão dispostos na TABELA 8.

A comparação dos resultados se deu realizando um teste-F, este retornou um valor de $p < 0,05$ indicando que havia diferença significativa entre as amostras e, portanto, não foi possível substituir o clorofórmio pelo éter de petróleo. Observa-se que, em média, o clorofórmio retirou o dobro (104,56% a mais) de MP da amostra se comparado com os resultados de quantidade de MP retirado pelo éter de petróleo.

TABELA 8 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE SELEÇÃO DO SOLVENTE.

| Solvente | MP ($\mu\text{g cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g cm}^{-2}$) | Variância | Teste F |
|------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Clorofórmio | 47,2376 | 47,9912 \pm 2,9218 | 8,5371 | p = 0,0454 |
| | 51,2160 | | | |
| | 45,5200 | | | |
| Éter de petróleo | 38,9223 | 23,4612 \pm 13,3908 | 179,3126 | F _{crítico} = 0,0526 |
| | 15,8997 | | | |
| | 15,5615 | | | |

FONTE: A autora (2021).

Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por RIEDERER e SCHENEIDER (1998), para a espécie *C. aurantium*, segundo os quais o clorofórmio foi o solvente mais eficiente dentre os solventes testados (tricloroetileno, tolueno, 1,1,1-tricloroetano, n-hexano e ciclohexano) em extrair lipídios solúveis cuticulares, substâncias que compõem a cera.

Análises de STAMMITT, DERRIDJ e GARREC (1996) feitas com a espécie *Prunus laurocerasus* mostraram que para o método de imersão da amostra em clorofórmio, método utilizado neste trabalho, mais de 50% de cada uma das 4 classes de compostos químicos (alcanos, álcoois primários, ácidos graxos livres e lipídeos polares) que compõem a cera foi extraído por imersão durante 5 s, já para 30 s ocorreu extração de 80% de cada classe. Os valores de porcentagem são em relação a resultados obtidos a partir da imersão das folhas em clorofórmio por 210 s. Uma vez que a porcentagem de cera extraída aumenta, quanto maior for o tempo de contato do solvente com as folhas, talvez fosse possível substituir o clorofórmio, fazendo testes com o éter de petróleo para diferentes durações maiores que 40 s, porém este teste não foi realizado neste estudo.

Tendo em vista os resultados obtidos no experimento e outros obtidos por outros autores, conclui-se que a eficiência de remoção do clorofórmio é maior. Dessa forma, nos experimentos seguintes que exigiram uso de solvente orgânico foi utilizado o clorofórmio.

Com a realização do teste para a seleção do solvente e escolha do clorofórmio foi finalizada a etapa de definição da metodologia. Previamente também foi determinado o tempo ótimo e melhor técnica de agitação das amostras, 1 min de forma manual para análises de sMP, e testado possíveis substituições para a filtração, este último não apresentou resultados positivos e, portanto, manteve-se o uso do *millipore* para a filtração da faixa de MP entre 0,45 e 2,5 μm .

5.3 AVALIAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO DE MP PELA ESPÉCIE *FICUS PUMILA* L.

A partir deste ponto foram realizadas análises que tiveram como objetivo avaliar o comportamento da fitorremediação pela espécie *Ficus pumila* L. sob diferentes perspectivas: quantificação da cera presente na folha da espécie, a cinética de fitorremediação, retenção de MP para diferentes estações do ano e variações de retenção entre duas alturas da parede verde.

5.3.1 Quantificação da cera epicuticular da espécie *Ficus pumila* L.

Amostras foram coletadas no ponto P1 às 8 horas do dia 25 de setembro de 2021 após um intervalo de 114 horas consecutivas (aproximadamente cinco dias) sem chuva (CEMADEN, 2021). As análises seguiram a metodologia descrita no item 4.4.2 para a quantificação do wMP, todas as amostras foram agitadas de forma manual por 40 s imersas em clorofórmio. Os resultados de wMP obtidos estão dispostos na TABELA 9.

TABELA 9 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DA CERA EPICUTICULAR.

| MP ($\mu\text{g cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g cm}^{-2}$) | Variância |
|------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 47,2376 | | |
| 55,7278 | 51,3938 \pm 4,2479 | 18,0446 |
| 51,2160 | | |

FONTE: A autora (2021).

Não foram encontrados na literatura dados sobre a quantificação da cera epicuticular para a espécie *Ficus pumila* L. Para as análises feitas neste trabalho obteve-se o valor médio para as amostras de $51,3938 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ para uma concentração de PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ de 27,18 e $10,73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ no ar, respectivamente. DZIERŻANOWSKI et al. (2011) analisou oito espécies (*Acer campestre* L., *Fraxinus excelsior* L., *Platanus × hispanica* Mill., *Tilia cordata* Mill., *Forsythia × intermedia* Zabel, *Hedera helix* L., *Physocarpus opulifolius*, *Spiraea japonica* L.) e os valores de massa de cera encontrados variaram de aproximadamente $25 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ a pouco mais de $200 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, mostrando que a quantidade de cera presente nas folhas das plantas varia de espécie para espécie, não há um valor padrão a ser esperado para todas as plantas.

5.3.2 Análise completa para as mesmas amostras

As amostras foram coletadas no ponto P1 às 8 horas do dia 25 de setembro de 2021 após um intervalo de 114 horas consecutivas (aproximadamente cinco dias) sem chuva. Realizou-se um experimento completo para quantificação do sMP e wMP com objetivo de comparar a quantidade de MP para cada fração que fica retida na cera epicuticular e superficialmente na folha. Os resultados estão dispostos na TABELA 10:

Os resultados obtidos apontaram que para as amostras coletadas havia mais poluente na cera do que depositado superficialmente sobre as folhas, isso ocorreu para as três frações analisadas. Mesmo que tenha se mantido a mesma tendencia de resultado para todas as frações nota-se que a retenção de wMP foi 69,34 e 66,69% ($2,0653$ e $14,7867 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), se comparado ao sMP, para as frações $\text{MP}_{2,5}$ e MP_8 , respectivamente. Já para a fração MP_{53} a porcentagem de MP absorvido pela cera foi inferior as demais frações, 53,68% ($64,4788 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), mas ainda superior a quantidade retida superficialmente, como mostra a FIGURA 18:

Os valores obtidos para a *Hedera helix* por HE, QIU e POTT (2019) mostram que para as frações MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ a retenção de wMP foi maior. Estes resultados estão em discordância com os resultados obtidos por DZIERŻANOWSKI et al. (2011) que analisou oito espécies (*Acer campestre* L., *Fraxinus excelsior* L., *Platanus × hispanica* Mill., *Tilia cordata* Mill., *Forsythia × intermedia* Zabel, *Hedera helix* L., *Physocarpus opulifolius*, *Spiraea japonica* L.) e para todas a retenção de sMP foi sempre maior para as frações MP_{100} e $\text{MP}_{2,5}$, enquanto que para a fração intermediária, MP_{10} , cinco

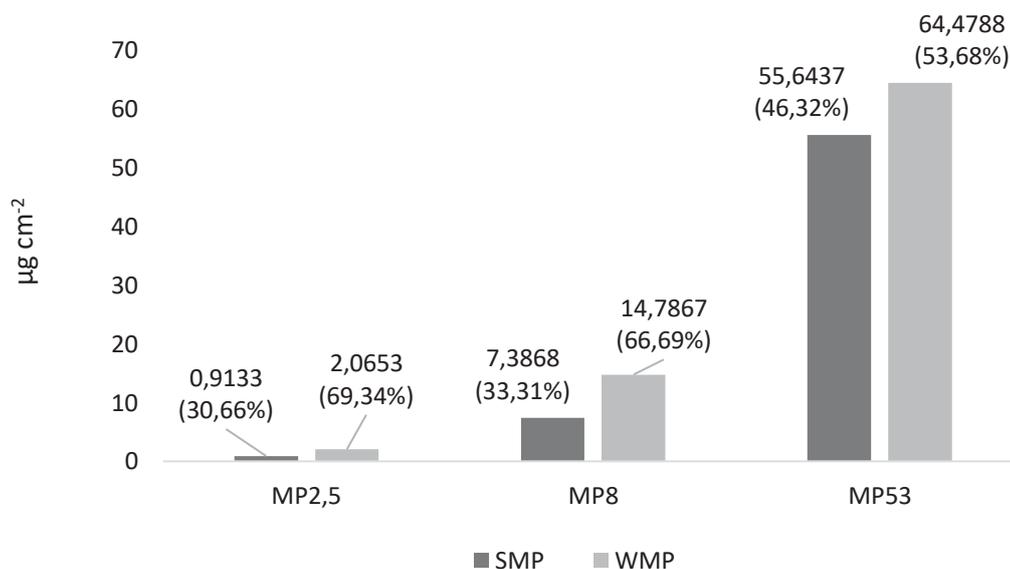
espécies, dentre elas a *Hedera helix*, apresentaram maior retenção para o sMP e outras três para o wMP. Dessa forma, nota-se que para uma mesma espécie encontram-se divergências na literatura para as características de deposição do MP.

TABELA 10 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO COMPLETA DA FITORREMEDIAÇÃO DE MP PELA ESPÉCIE *FICUS PUMILA* L.

| | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância |
|--------------------------|---|---|-----------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | |
| sMP | 0,8489 | 0,9133± 0,0638 | 0,0041 |
| | 0,9147 | | |
| | 0,9764 | | |
| wMP | 2,3031 | 2,0653± 0,2384 | 0,0568 |
| | 1,8262 | | |
| | 2,0666 | | |
| 2,5 a 8 μm | | | |
| sMP | 8,8117 | 7,3868± 1,4466 | 2,0926 |
| | 7,4293 | | |
| | 5,9195 | | |
| wMP | 14,8697 | 14,7867± 0,5957 | 0,3548 |
| | 14,1538 | | |
| | 15,3365 | | |
| 8 a 53 μm | | | |
| sMP | 55,3093 | 55,6437± 1,7000 | 2,8900 |
| | 54,1358 | | |
| | 57,4861 | | |
| wMP | 69,0415 | 64,4788± 4,9121 | 24,1290 |
| | 65,1156 | | |
| | 59,2794 | | |

FONTE: A autora (2021).

FIGURA 18 - MASSA DE MP RETIDA PARA CADA FRAÇÃO NA CERA E SUPERFICIALMENTE.



FONTE: A autora (2021).

Os valores totais de massa de MP obtidos para cada fração sem distinção de tipo de deposição e valores totais para cada tipo de deposição sem distinção de fração estão dispostos na TABELA 11:

TABELA 11 - VALORES TOTAIS DE MASSA DE MP RETIDO POR FRAÇÃO E TIPO DE DEPOSIÇÃO.

| Quantidade de MP (sMP + wMP) por fração | | |
|---|---------------------|-------|
| | µg.cm ⁻² | % |
| MP _{2,5} | 2,9786 | 2,05 |
| MP ₁₀ | 22,1735 | 15,26 |
| MP ₅₃ | 120,1226 | 82,69 |
| Quantidade de MP por tipo de retenção | | |
| | µg.cm ⁻² | % |
| sMP | 63,9439 | 44,02 |
| wMP | 81,3308 | 55,98 |
| Total | 145,2747 | 100 |

FONTE: A autora (2021).

Ao se comparar, apenas entre as frações as massas de MP retido, a planta mostrou diferenças, sendo sua capacidade de retenção de quase 83% para a fração MP₅₃, com um valor médio de 120,12 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ e menor capacidade de retenção para a fração menor, MP_{2,5}, com 2,98 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (2%). Essa tendência ocorreu tanto para o sMP quanto para o wMP. Os resultados encontrados por HE, QIU e POTT (2019) apontaram a mesma tendência, porém apenas para o sMP. Ao se analisar a espécie *Hedera helix* para qual a capacidade de retenção da fração maior (de 10 a 100 μm) foi sempre maior, em torno de 5 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, já para as frações intermediária e menor a retenção ficou em torno de 2 e 0,5 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente.

Quanto aos valores encontrados neste presente trabalho, em comparação aos encontrados por DZIERŻANOWSKI et al. (2011), para a fração MP_{2,5} eles se mantiveram relativamente próximos entre 0 e 2 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, já para as frações intermediária e maior os valores obtidos foram maiores, sendo para a última três vezes maior, que os encontrados pelo autor para as oito espécies estudadas. Já PRZYBYSZ, NERSISYAN e GAWROŃSKI (2019), ao estudar três espécies (*Pinus nigra*, *Taxus baccata* e *Carpinus betulus*), obtiveram valores altos de sMP e wMP, 70,2 e 44,4 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente, para fração maior para a espécie *Pinus nigra*, enquanto que para a espécie *Carpinus betulus* os valores foram de 2,34 e 1,62 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, ambas espécies submetidas às mesmas condições.

Na TABELA 12 são apresentados os valores obtidos por PRZYBYSZ, NERSISYAN e GAWROŃSKI (2019), e por este trabalho é possível ver a grande variação de valores de MP para a faixa de diâmetro maior entre as três espécies analisadas pelos autores, estas submetidas as mesmas condições.

Inúmeros são os fatores que influenciam a quantidade de MP depositado sobre as plantas, os mais significativos são a concentração do poluente no ar, as características da folha que variam de acordo com a espécie e as condições climáticas do local, como temperatura e umidade (POPEK et al., 2018; ZHANG et al., 2019). Diante disso, entende-se que é esperado que haja grandes diferenças entre os valores de MP retido por plantas de diferentes espécies submetidas a condições diferentes, uma vez que essas diferenças ocorrem mesmo entre espécies que estão submetidas às mesmas condições.

TABELA 12 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR PRZYBYSZ, NERSISYAN E GAWROŃSKI (2019) E POR ESTE TRABALHO.

| Autor | Espécie | 0,2 a 2,5 µm | | | 2,5 a 10 µm | | | 10 a 100 µm | | | Temperatura (°C) |
|--|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|---|-------|------------------|
| | | sMP (µg.cm ⁻²) | wMP (µg.cm ⁻²) | sMP (µg.cm ⁻²) | wMP (µg.cm ⁻²) | sMP (µg.cm ⁻²) | wMP (µg.cm ⁻²) | Conc. MP _{2,5} no ar (µgm ⁻³) | Conc. MP ₁₀ no ar (µgm ⁻³) | | |
| PRZYBYSZ, NERSISYAN e GAWROŃSKI (2019) | <i>Pinus nigra</i> | 1,84 | 2,30 | 3,63 | 5,36 | 70,20 | 44,3 | | | | |
| | | 0,81 | 0,64 | 1,47 | 2,67 | 25,90 | 22,50 | 0,70 | 42,90 | 57,80 | |
| PRZYBYSZ, NERSISYAN e GAWROŃSKI (2019) | <i>Taxus baccata</i> | 0,85 | 0,50 | 1,66 | 1,13 | 2,34 | 1,62 | | | | |
| | | 0,45 a 2,5 µm | 2,5 a 8 µm | 8 a 53 µm | | | | | | | |
| A autora (2022) | <i>Ficus pumila</i> L. | 0,9133 | 2,0657 | 7,3868 | 14,7867 | 55,6437 | 64,4788 | 21,00 | 23,27 | 28,34 | |

FONTE: PRZYBYSZ; NERSISYAN; GAWROŃSKI (2019); A autora (2022).

Quanto a relação entre a quantidade de cera presente na planta e a retenção de wMP, os estudos de DZIERŻANOWSKI et al. (2011) encontraram para as espécies *Acer campestre* L e *Physocarpus opulifolius* valores de quantidade de cera em torno de $50 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, valor próximo ao obtido neste trabalho para a *Ficus pumila* L., $51,3938 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Para a espécie *Acer campestre* L DZIERŻANOWSKI et al. (2011) obteve valores de sMP em torno de 7 e $2 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, para as frações maior e intermediária de diâmetro, respectivamente. Já para a espécie *Physocarpus opulifolius* foram relatados valores em torno de 5, 2 e $0,5 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, para as frações maior, intermediária e menor de diâmetro, respectivamente. Todos estes valores estão abaixo dos valores de wMP obtidos neste trabalho para a *Ficus pumila* L. ($2,0657$, $14,7867$ e $64,4788 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente). Apesar de apresentarem quantidades de cera epicuticular similares em suas folhas a espécie *Ficus pumila* L. teve uma maior retenção de wMP quando comparada com as outras duas.

O estudo de várias espécies é importante para que possam ser avaliados seus potenciais de remediação individualmente, já que não há um comportamento padrão a ser esperado para todas as plantas, tendo em vista suas diferentes características que podem ter influência na fitorremediação. Com este estudo foi possível verificar os benefícios desta técnica para remoção do MP do ar pela espécie *Ficus pumila* L.

5.3.3 Cinética de fitorremediação

As amostras foram coletadas em quatro momentos distintos no ponto P1 a fim de se analisar a cinética da fitorremediação. As datas e intervalos sem chuva anterior a cada coleta estão dispostos na TABELA 13 bem como os resultados dos experimentos.

Ocorreram variações, em espacial, entre cinco e sete dias, provavelmente a proximidade do período de coleta e as muitas variáveis não controladas do ensaio. Para a fração menor houve uma diminuição de quantidade de poluente do intervalo de 178 a 211 horas, quando se esperava que houvesse aumento, uma vez que o segundo intervalo é mais longo e a concentração de $\text{MP}_{2,5}$ no ar para este último foi maior. Este resultado está demonstrado na FIGURA 19.

TABELA 13 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO.

| Data da coleta | Horas sem chuva | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância |
|--------------------------|--------------------|--|--|-----------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | |
| 25/09/2021 | 114h | 0,8511 | 0,8386 \pm 0,0198 | 0,0004 |
| | | 0,8489 | | |
| | | 0,8158 | | |
| 28/09/2021 | 178h | 0,6150 | 1,1353 \pm 1,1595 | 1,3443 |
| | | 0,3278 | | |
| | | 2,4642 | | |
| 25/08/2021 | 211h | 0,7139 | 0,8430 \pm 0,2163 | 0,0468 |
| | | 1,0927 | | |
| | | 0,7224 | | |
| 10/08/2021 | 329h | 1,6004 | 1,5611 \pm 0,3227 | 0,1041 |
| | | 1,8623 | | |
| | | 1,2205 | | |
| 2,5 a 8 μm | | | | |
| 25/09/2021 | 114h | 2,6903 | 3,7418 \pm 1,8863 | 3,5583 |
| | | 2,6155 | | |
| | | 5,9195 | | |
| 28/09/2021 | 178h | 4,9763 | 6,2226 \pm 3,3119 | 10,9689 |
| | | 3,7146 | | |
| | | 9,9769 | | |
| 25/08/2021 | 211h | 14,3607 | 10,9953 \pm 3,1159 | 9,7088 |
| | | 8,2107 | | |
| | | 10,4143 | | |
| 10/08/2021 | 329h | 11,5623 | 11,7480 \pm 0,3065 | 0,0939 |
| | | 12,1017 | | |
| | | 11,5799 | | |

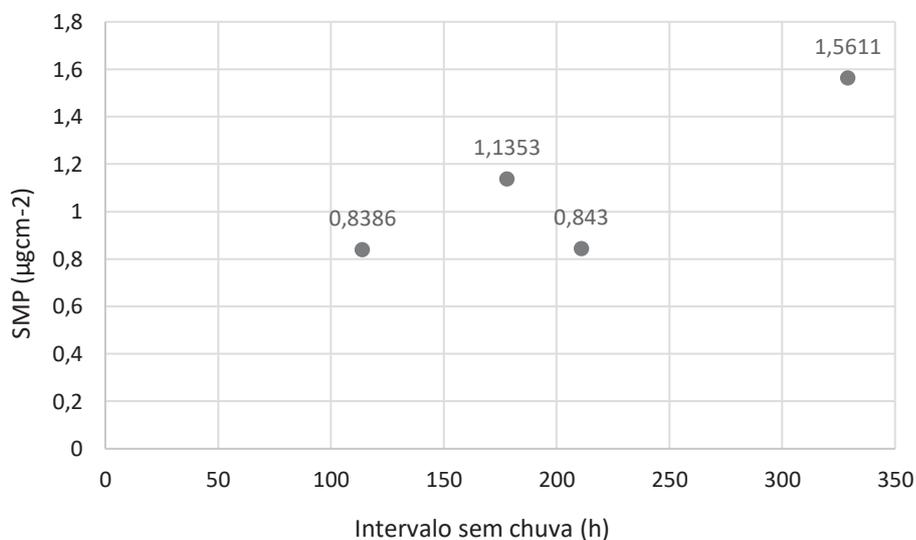
Continua...

Continuação

TABELA 14 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO.

| Data da coleta | Horas sem chuva | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância |
|----------------|-----------------|--|--|-----------|
| | | 8 a 53 μm | | |
| 25/09/2021 | 114h | 44,8094 | 39,5699 \pm 17,7745 | 315,9339 |
| | | 19,7646 | | |
| | | 54,1358 | | |
| 28/09/2021 | 178h | 55,6340 | 51,0951 \pm 6,1599 | 37,9438 |
| | | 44,0830 | | |
| | | 53,5683 | | |
| 25/08/2021 | 211h | 44,8680 | 51,1525 \pm 8,0234 | 64,3754 |
| | | 60,1900 | | |
| | | 48,3995 | | |
| 10/08/2021 | 329h | 72,7567 | 77,0849 \pm 6,5323 | 42,6714 |
| | | 73,8991 | | |
| | | 84,5989 | | |

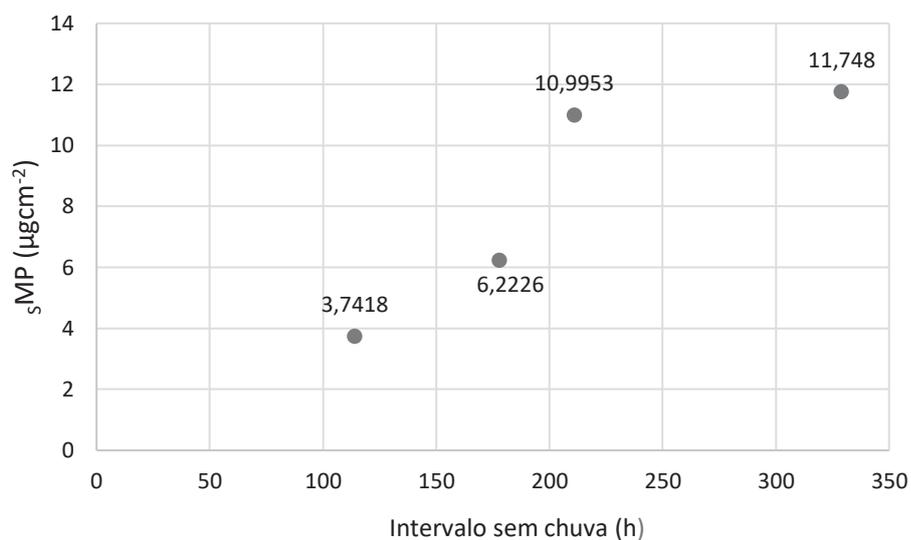
FONTE: A autora (2021).

FIGURA 19 - RELAÇÃO ENTRE O $\text{sMP}_{2,5}$ PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h) PARA A FRAÇÃO DE 0,45 A 2,5 μm .

FONTE: A autora (2021).

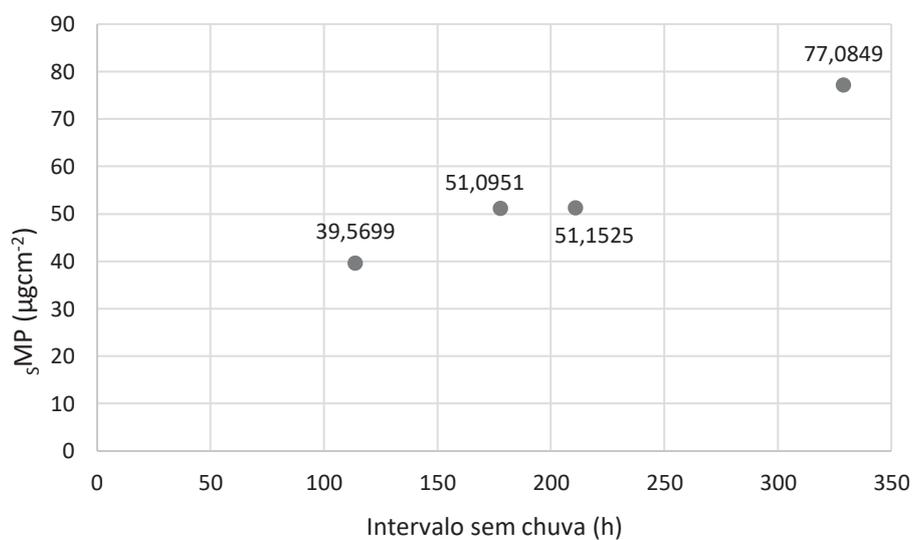
Para as duas frações maiores ocorreu aumento progressivo de quantidade de poluente presente nas folhas, conforme o período de tempo consecutivo sem chuva aumentou, como é possível visualizar nas FIGURAS 20 e 21:

FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE O sMP_8 PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h) PARA A FRAÇÃO DE 2,5 A 8 μm .



FONTE: A autora (2021).

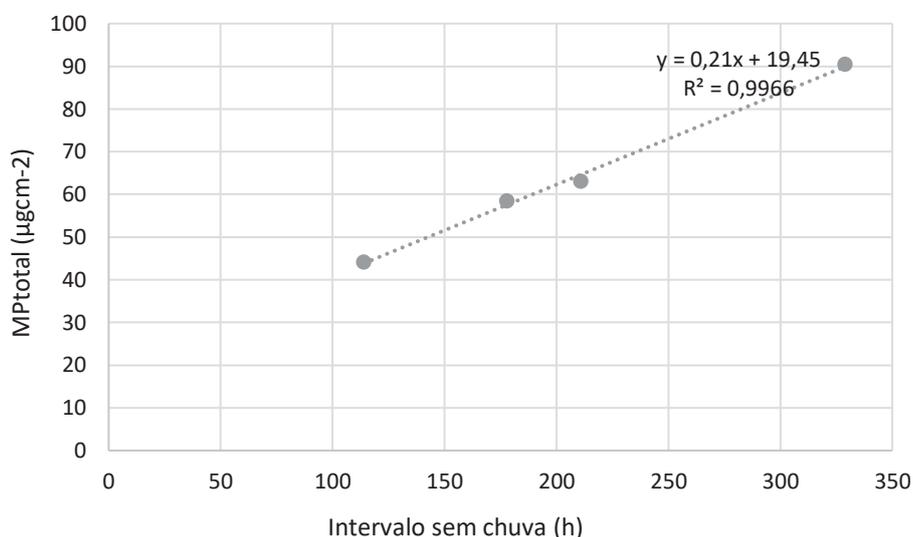
FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE O sMP_{53} PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h) PARA A FRAÇÃO DE 8 A 53 μm .



FONTE: A autora (2021).

Na FIGURA 22 é possível observar o comportamento da retenção do MP_{total} .

FIGURA 22 - RELAÇÃO ENTRE O SMP_{total} PRESENTE NA FOLHA COM O INTERVALO SEM CHUVA (h).



FONTE: A autora (2021).

Os resultados possibilitaram verificar que a massa de MP retida nas folhas favorece a fitorremediação e para a *Ficus pumila* L. segue um modelo de ordem zero representado pela equação 3:

$$\frac{dC_{MP}}{dt} = k \quad (3)$$

Onde:

C_{MP} : concentração de MP retido na folha ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$);

t: tempo (h);

k: constante da taxa de fitorremediação de MP nas folhas ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

O modelo foi obtido com os valores médios, porém este tem somente o objetivo de prever a quantidade de MP presente no ar que pode ser fitorremediada. Este pode ser útil para estimar a quantidade de MP que pode ser removida na presença de paredes verdes. Esta quantidade pode ser obtida pela equação 4:

$$C_{MP} = 0,21t + 19,45 \quad (4)$$

Modelos mais precisos poderiam ser obtidos em ambientes com maior controle das variáveis envolvidas, em especial a simulação de chuvas.

Para os quatro intervalos de tempo, as médias da umidade se mantiveram acima do 99%, portanto, não houveram variações para esse parâmetro que possam ter influenciado a deposição de MP na planta, já para a temperatura também não ocorreram grandes variações sendo o período mais frio o de 329 horas com uma média de 15,59 °C, para os outros três as temperaturas médias se mantiveram entre 18 e 21 °C (LACTEA, 2021). Os dados de temperatura e umidade para cada intervalo de tempo considerado pré-coleta estão apresentados na TABELA 14:

TABELA 15 - QUANTIDADE MÉDIA DE MP PRESENTE NA FOLHA, DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE MP NO AR E DADOS METEOROLÓGICOS.

| Horas sem chuva | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Conc. de MP _{2,5} no ar ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | Conc. de MP ₁₀ no ar ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | Temperatura (°C) | Umidade (%) |
|--------------------------|---|--|---|------------------|-------------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | |
| 114h | 0,8386 | 10,73 | - | 18,32 | 99,88 |
| 178h | 1,1353 | 8,65 | - | 20,11 | 99,11 |
| 211h | 0,8430 | 23,27 | - | 21,00 | 99,80 |
| 329h | 1,5611 | 17,19 | - | 15,59 | 99,82 |
| 2,5 a 8 μm | | | | | |
| 114h | 3,7418 | - | 27,18 | 18,32 | 99,88 |
| 178h | 6,2226 | - | 23,61 | 20,11 | 99,11 |
| 211h | 10,9953 | - | 28,34 | 21,00 | 99,80 |
| 329h | 11,7480 | - | 20,87 | 15,59 | 99,82 |
| 8 a 53 μm * | | | | | |
| 114h | 39,5699 | - | - | 18,32 | 99,88 |
| 178h | 51,0951 | - | - | 20,11 | 99,11 |
| 211h | 51,1525 | - | - | 21,00 | 99,80 |
| 329h | 77,0849 | - | - | 15,59 | 99,82 |

FONTE: A autora (2021); LACTEA (2021).

* Não há dados de medição de concentração de MP no ar para diâmetros maiores que 10 μm .

Apesar de não ser possível controlar as condições do experimento, como concentração de MP no ar, a preservação do local da coleta, quantidades de dia consecutivos sem chuva, foi possível observar que não ocorreu a saturação das folhas com MP nas três frações analisadas havendo aumento da concentração de poluente durante o período de 329 horas (aproximadamente 13 dias) sem chuva.

Estudos com períodos de tempo mais longos sem chuva seriam necessários para verificar se ocorre a saturação das folhas com o MP, contudo, devido às características locais da cidade de Curitiba, como citado anteriormente, uma cidade que mantém altos níveis de precipitação, não foi possível realizar neste trabalho.

Outra possibilidade para a metodologia deste experimento seria fazê-lo para o mesmo período de tempo longo sem chuva, isto é, fazer as coletas para cinco, sete, nove, 13 e mais dias dentro do mesmo intervalo de tempo, dentro do mesmo mês e estação (devido a condições meteorológicas e problemas operacionais não foi possível implementar esta metodologia no período deste estudo). Assim, todas as amostras estariam sujeitas às mesmas condições ou condições mais parecidas de concentração de poluentes no ar e variáveis meteorológicas.

5.3.4 Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes estações do ano

As amostras foram coletadas em três momentos distintos no ponto P1, a fim de se analisar a quantidade de poluente depositado nas folhas da espécie para diferentes estações, outono, inverno e primavera. As datas e intervalos sem chuva, anterior a cada coleta, estão dispostos na TABELA 15, bem como os resultados dos experimentos.

Os testes ANOVA resultaram em p-valores $< 0,05$ indicando que havia diferença significativa entre as amostras de estação para cada faixa. Após isso, realizou-se testes-F (análise de variância para dois grupos) para cada par de amostras de tempo, porém estes não resultaram em diferença significativa e, portanto, não foi possível identificar o grupo diferente.

TABELA 16 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA AS ESTAÇÕES DE OUTONO, INVERNO E PRIMAVERA.

| Estação do ano | Data da coleta | Horas sem chuva | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância | ANOVA |
|--------------------------|----------------|-----------------|---|---|-----------|---|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | | |
| Outono | 19/05/2021 | 159h | 0,5211 | 0,5028± 0,0502 | 0,0025 | |
| | | | 0,5413 | | | |
| | | | 0,4461 | | | |
| Inverno | 25/08/2021 | 211h | 0,7139 | 0,8430± 0,2163 | 0,0468 | p = 0,0019 F = 21,1916 F _{crítico} = 5,1433 |
| | | | 1,0927 | | | |
| | | | 0,7224 | | | |
| Primavera | 25/11/2021 | 169h | 0,1034 | 0,1401± 0,0564 | 0,0032 | |
| | | | 0,2050 | | | |
| | | | 0,1118 | | | |
| 2,5 a 8 μm | | | | | | |
| Outono | 19/05/2021 | 159h | 4,1617 | 5,2612± 1,1038 | 1,2185 | |
| | | | 5,2525 | | | |
| | | | 6,3694 | | | |
| Inverno | 25/08/2021 | 211h | 14,3607 | 13,4487± 2,6966 | 7,2719 | p = 0,0030 F = 17,7246 F _{crítico} = 5,1433 |
| | | | 15,5711 | | | |
| | | | 10,4143 | | | |
| Primavera | 25/11/2021 | 169h | 7,0217 | 7,6616± 0,7104 | 0,5047 | |
| | | | 7,5370 | | | |
| | | | 8,4260 | | | |

Continua ...

Continuação

TABELA 17 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA AS ESTAÇÕES DE OUTONO, INVERNO E PRIMAVERA.

| Estação do ano | Data da coleta | Horas sem chuva | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância | ANOVA |
|----------------------|----------------|-----------------|---|---|-----------|---|
| 8 a 53 μm | | | | | | |
| Outono | 19/05/2021 | 159h | 16,7511 | 15,5111 \pm 1,1085 | 1,2288 | |
| | | | 14,6160 | | | |
| | | | 15,1663 | | | |
| Inverno | 25/08/2021 | 211h | 44,8680 | 43,9007 \pm 5,0523 | 25,5261 | p = 0,0002 F = 48,4653 F _{crítico} = 5,1433 |
| | | | 38,4347 | | | |
| | | | 48,3995 | | | |
| Primavera | 25/11/2021 | 169h | 20,3902 | 22,2733 \pm 3,7526 | 14,0818 | |
| | | | 19,8351 | | | |
| | | | 26,5945 | | | |

FONTE: A autora (2021).

Sabe-se que a deposição de MP nas folhas das plantas tem influência de variáveis como a concentração de poluente no ar, temperatura e umidade. Para uma melhor visualização estão dispostos na TABELA 16 apenas os resultados de massa de sMP obtido para as frações MP_{2,5} e MP₈, as concentrações de MP no ar correspondente a cada fração, umidade relativa média e temperatura média para os períodos sem chuva considerado antes de cada coleta.

Analisando os dados de concentração de MP no ar e massa de MP retido para as amostras, foi possível perceber que ocorreu uma relação direta para as duas frações menores, isto é, quanto maior a concentração do poluente no ar maior foi a quantidade de MP depositado na folha.

Quanto a tendências entre as frações, ocorreram divergências. Os maiores valores de deposição foram encontrados nos experimentos de inverno para ambas, 0,8430 e 13,4487 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, para o MP_{2,5} e MP₈, respectivamente. Contudo para a fração de MP_{2,5} o segundo maior valor de MP foi obtido para o experimento de outono, 0,5028 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, enquanto que para a fração MP₈ isso ocorreu para o experimento de primavera, 7,6616 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Para a maior fração, da mesma forma, a maior retenção

de poluente ocorreu para o período de inverno, para o qual se obteve um valor de 43,9007 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

TABELA 18 - RESULTADOS DE MASSA DE MP OBTIDOS PARA AS FRAÇÕES MENORES, CONCENTRAÇÃO DE MP NO AR, UMIDADE E TEMPERATURA MÉDIAS PARA AS ESTAÇÕES DO ANO.

| | Outono | Inverno | Primavera |
|--|---------|---------|-----------|
| Umidade (%) | 98,96 | 99,80 | 93,08 |
| Temperatura média (°C) | 16,42 | 21,00 | 22,58 |
| 0,45 a 2,5 μm | | | |
| sMP _{2,5} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 0,5028 | 0,8430 | 0,1401 |
| sMP _{2,5} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$) | 0,0032 | 0,0040 | 0,0008 |
| Conc. de MP _{2,5} no ar ($\mu\text{g}\text{m}^{-3}$) | 15,53 | 23,27 | 5,75 |
| 2,5 a 8 μm | | | |
| sMP ₈ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 5,2612 | 13,4487 | 7,6616 |
| sMP ₈ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$) | 0,0331 | 0,0637 | 0,0453 |
| Conc. de MP ₁₀ no ar ($\mu\text{g}\text{m}^{-3}$) | 17,92 | 28,34 | 20,74 |
| 8 a 53 μm | | | |
| sMP ₅₃ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 15,5111 | 43,9007 | 22,2733 |
| sMP ₅₃ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$) | 0,0976 | 0,2081 | 0,1318 |
| sMP total | 21,2751 | 58,1924 | 30,0750 |

FONTE: A autora (2021); LACTEA (2021).

Ao analisar o MP_{total}, retido nas amostras para cada estação, isto é, a soma das três frações de diâmetro, os maiores valores observados ainda são para o experimento de inverno, 58,1924 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Isto sugere que das três variáveis consideradas, concentração de MP no ar, umidade e temperatura, a primeira teve maior influência na deposição de poluentes. Contudo, podem haver influências indiretas, uma vez que a concentração do poluente no ar tende a ser maior em temperaturas mais frias (MAJEWSKI et al., 2011 apud PRZYBYSZ; NERSISYAN;

GAWROŃSKI, 2019), o que de fato foi observado, os valores foram maiores de concentração e deposição foram obtidos para a análises de inverno.

Nota-se, pelos dados da TABELA 16, que mesmo que tenham ocorrido variações de temperatura e umidade, essas foram pequenas para os períodos considerados. As temperaturas médias para o período de inverno e primavera ficaram bem próximas, 21 e 22,58 °C; já para outono a média ficou em 16,42 °C, menor temperatura observada. Quanto às médias de umidade relativa, para os três períodos, todas mantiveram-se acima de 90%. Apesar de valores altos de umidade serem esperados, pois como demonstrado na FIGURA 8 a cidade de Curitiba mantém valores altos de umidade relativa ao longo do ano todo, estes valores apresentados na TABELA 16 podem ser considerados atípicos, pois o maior valor de umidade foi registrado no período de inverno que em geral é o período menos úmido na cidade.

5.3.5 Avaliação da fitorremediação de MP em diferentes faixas de altura

Para esta avaliação, as amostras de folhas foram coletadas no ponto P1 em duas faixas de alturas, de 1 a 1,5 m e de 1,5 a 2 m em relação ao chão, estas foram denominadas A1 e A2, respectivamente. As coletas foram realizadas às 8 horas do dia 28 de setembro de 2021 após um intervalo de 178 horas consecutivas (aproximadamente sete dias) sem chuva (CEMADEN, 2021). As análises seguiram a metodologia descrita no item 4.41 para a quantificação do sMP . Os resultados de wMP obtidos estão dispostos na TABELA 17.

Os resultados obtidos para as três frações de SMP indicam um mesmo padrão, isto é, as médias de quantidades de SMP retido nas faixas mais baixas, A1, são maiores. Para os três diferentes tamanhos de partícula a retenção da faixa mais baixa de altura foi maior que 50%. As maiores diferenças ocorreram para as frações de menores diâmetros, 0,45 a 2,5 μm e 2,5 a 8 μm , nas quais 59,80 e 62,18% do SMP retido estava presente na faixa mais baixa da parede verde, respectivamente. Os valores de porcentagem para a fração com maior diâmetro de partícula não se mostraram tão discrepantes, uma vez que, para esta 53,49% do SMP ficou retido na faixa mais baixa de altura, 1 a 1,5 m em relação ao chão.

TABELA 19 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE COMPARAÇÃO DE DIFERENTES FAIXAS DE ALTURA.

| Altura (m) | MP ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Média ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Variância | % do MP | Teste F |
|---|---|--|-----------|---------|-----------------------------------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | |
| 1 a 1,5 (A1) | 1,2279 | 1,0896 \pm 0,1299 | 0,0169 | 59,80 | p = 0,0696 |
| | 0,9702 | | | | |
| | 1,0708 | | | | |
| | | | | | F = 13,3582 |
| 1,5 a 2 (A2) | 0,6150 | 0,7326 \pm 0,4747 | 0,2254 | 40,20 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 1,2551 | | | | |
| | 0,3278 | | | | |
| 2,5 a 8 μm | | | | | |
| 1 a 1,5 (A1) | 8,9419 | 10,2292 \pm 1,1176 | 1,2491 | 62,18 | p = 0,1022 |
| | 10,7933 | | | | |
| | 10,9523 | | | | |
| | | | | | F = 8,7814 |
| 1,5 a 2 (A2) | 4,9763 | 6,2226 \pm 3,3119 | 10,9690 | 37,82 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 3,7146 | | | | |
| | 9,9769 | | | | |
| 8 a 53 μm | | | | | |
| 1 a 1,5 (A1) | 60,5182 | 64,2418 \pm 4,6320 | 5,7843 | 53,49 | p = 0,2123 |
| | 62,7782 | | | | |
| | 69,4288 | | | | |
| | | | | | F = 3,7093 |
| 1,5 a 2 (A2) | 55,6340 | 55,8552 \pm 2,4051 | 21,4558 | 46,51 | F _{crítico} = 19,0000 |
| | 58,3632 | | | | |
| | 53,5683 | | | | |
| MP total por faixa de altura ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | | | | | |
| 1 a 1,5 (A1) | | | | 75,5606 | |
| 1,5 a 2 (A2) | | | | 62,8104 | |

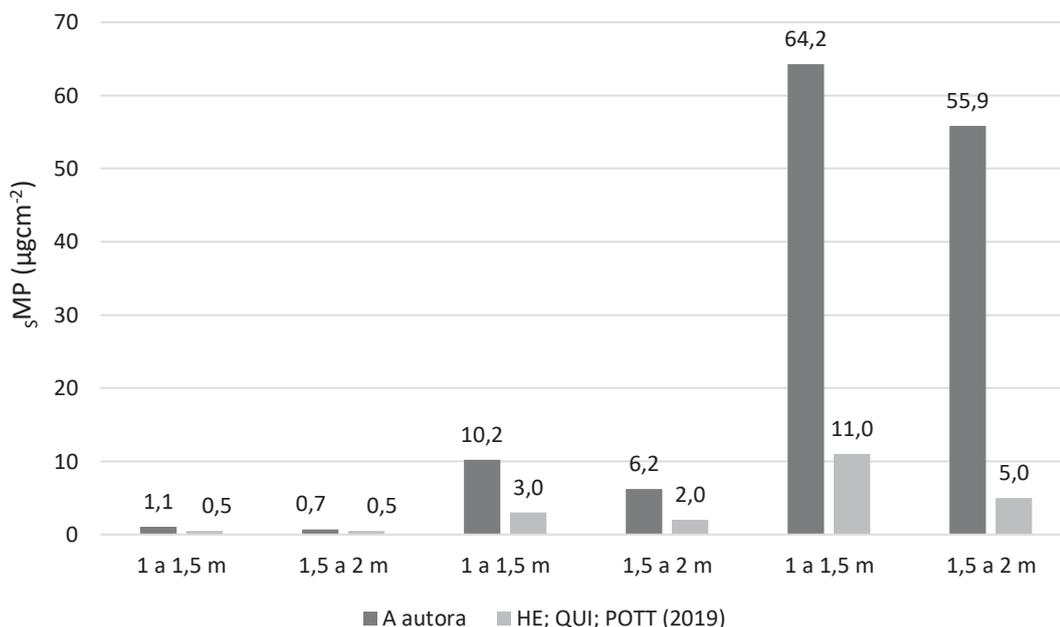
FONTE: A autora (2021).

Os estudos conduzidos por HE, QIU e POTT (2019), para a espécie *Hedera helix*, ao analisar 4 faixas diferentes de altura de uma parede verde em relação ao chão, 0,5 a 1 m, 1 a 1,5 m, 1,5 a 2 m e acima de 2 m, apontaram que a zona mais baixa, de 0,5 a 1 m, teve uma maior capacidade de retenção. Para a fração de MP com diâmetro maior que 10 μm a faixa de 0,5 a 1 m reteve seis vezes mais poluente que a faixa acima de 2 m (19,83 e 3,55 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente), para esta foram encontradas diferenças estatísticas significativas, já para diâmetros de partícula entre 2,5 a 10 μm a faixa mais baixa de altura reteve 3 vezes mais poluente quando comparada com a faixa acima de 2 m. Para a fração abaixo de 2,5 μm todas as zonas de altura mostraram baixa capacidade de retenção com valores menores do que 2 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, resultados próximos aos encontrados neste trabalho.

De acordo com LELOSSY et al. (2014), para a deposição seca, partículas menores são depositadas de forma semelhante aos gases, já a remoção de partículas de diâmetros maiores é governada principalmente por sedimentação, ou seja, por ação da gravidade. Desta forma partículas com maiores diâmetro e massa sedimentam mais rápido o que corrobora para neste estudo ter sido encontrada uma maior deposição de MP nas folhas na faixa de altura mais baixa (1 a 1,5 m). Deve-se considerar também que os escapamentos dos veículos se encontram próximo ao solo e como a parede verde avaliada neste estudo está a apenas 2,99 m da faixa de veículo esperava-se que a concentração de MP na faixa inferior (1 a 1,5 m) realmente fosse maior do que a superior (1,5 a 2 m).

Os valores obtidos para cada fração para as alturas de 1 a 1,5 m e 1,5 a 2 m por HE, QIU e POTT (2019), mesmas frações analisadas neste trabalho estão apresentadas no gráfico da FIGURA 23, nele é possível observar que, a quantidade de MP retido é maior para a faixa de altura menor, bem como as diferenças de valores obtidas por HE, QIU e POTT (2019) e por este trabalho.

FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO COM OS OBTIDOS POR HE, QIU E POTT (2019) PARA DUAS FAIXAS DE ALTURA DA PAREDE VERDE.



FONTE: A autora (2021); HE; QIU; POTT (2019).

O teste-F não apontou haver diferença significativa ($p > 0,05$) entre as duas faixas de altura avaliadas neste estudo para nenhuma das três frações de sMP, o que é um resultado positivo, pois significa que a parede verde atua na fitorremediação de MP de em toda a sua altura, e não apenas próximo ao solo.

As discrepâncias de valores obtidos para a *Ficus pumila* L. neste este trabalho e por HE, QIU e POTT (2019) para a *Hedera helix* podem ser explicadas pelo fato que as análises foram feitas com espécies diferentes, submetidas a níveis de poluição diferentes, entre outras condições que influenciam a retenção do poluente como variáveis meteorológicas e distância em relação a fonte, por exemplo. Contudo, apesar das divergências pontuais encontradas ao se fazer comparações de capacidade de retenção de cada faixa de altura combinadas aos diâmetros das partículas, em geral, pode-se concluir que folhas presentes em zonas mais baixas de uma parede verde retém mais poluente que folhas presentes em regiões mais altas.

Quanto à retenção total de sMP, independente da faixa de altura, os resultados seguiram a tendência esperada, isto é, quanto maior o diâmetro da partícula maior a sua capacidade de retenção pela folha da planta.

5.3.6 Eficácia da fitorremediação do MP pela *Ficus pumila* L.

Este tópico teve por objetivo fazer uma análise do sMP geral dos experimentos realizados neste trabalho, de forma a avaliar a eficácia da fitorremediação pela *Ficus pumila* L. Para determinar a eficácia foi determinada a taxa de remoção de MP (%). Para obter a taxa foi calculado a quantidade de MP na folha por hora ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) (horas sem chuvas consideradas pré-coleta) e este valor foi dividido pela concentração de MP no ar. Esta análise foi feita apenas para as frações menores, 0,45 a 2,5 μm e 2,5 a 8 μm , uma vez que não há dados de concentração de MP no ar para a fração maior.

De acordo com os dados da TABELA 18, é possível ver que para experimento de análise completa para as mesmas amostras a taxa de remoção para a menor fração foi de 0,02% já para a fração intermediária ficou em 0,12%.

TABELA 20 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA EXPERIMENTO DE ANÁLISE COMPLETA.

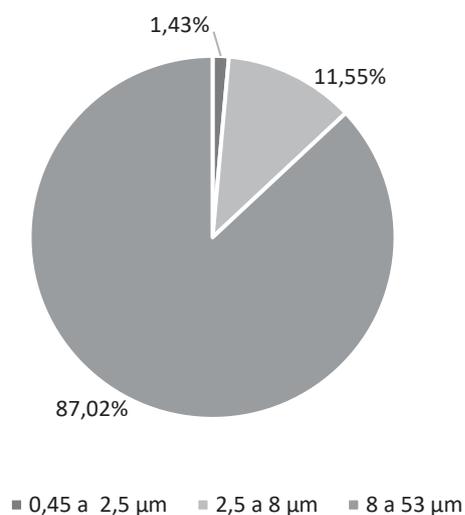
| Horas | Conc. de MP no ar ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | MP na folha ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | MP na folha h^{-1} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) | Umidade (%) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Taxa de remoção (%) |
|--------------------------|---|--|--|-------------|------------------------------------|---------------------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | | |
| 211 | 23,27 | 0,9133 | 0,0043 | 99,80 | 21,00 | 0,02 |
| 2,5 a 8 μm | | | | | | |
| 211 | 28,34 | 7,3868 | 0,0350 | 99,80 | 21,00 | 0,12 |

FONTE: A autora (2022).

Quanto a distribuição do sMP para cada fração de diâmetro é possível ver pela FIGURA 24 que a menor fração reteve 1,43% do MP total da amostra. Já as frações intermediária e maior retiveram 11,55 e 87,02%, respectivamente.

Para os experimentos de cinética de fitorremediação, o cálculo da porcentagem de MP removido por hora mostra uma taxa de remoção praticamente constante para os resultados, o que está de acordo com o modelo de ordem zero. É possível observar, pelos dados da TABELA 19, que a taxa varia entre 0,2 e 0,7% e entre 0,12% e 0,18% para a fração menor e intermediária, respectivamente. A diminuição de MP nas folhas ocorrida entre os períodos de 178 e 211 horas para a fração menor de diâmetro deve-se, provavelmente, ao grande número de variáveis não controladas do estudo.

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DO SMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA O EXPERIMENTO DE ANÁLISE COMPLETA PARA AS MESMAS AMOSTRAS.



FONTE: A autora (2022).

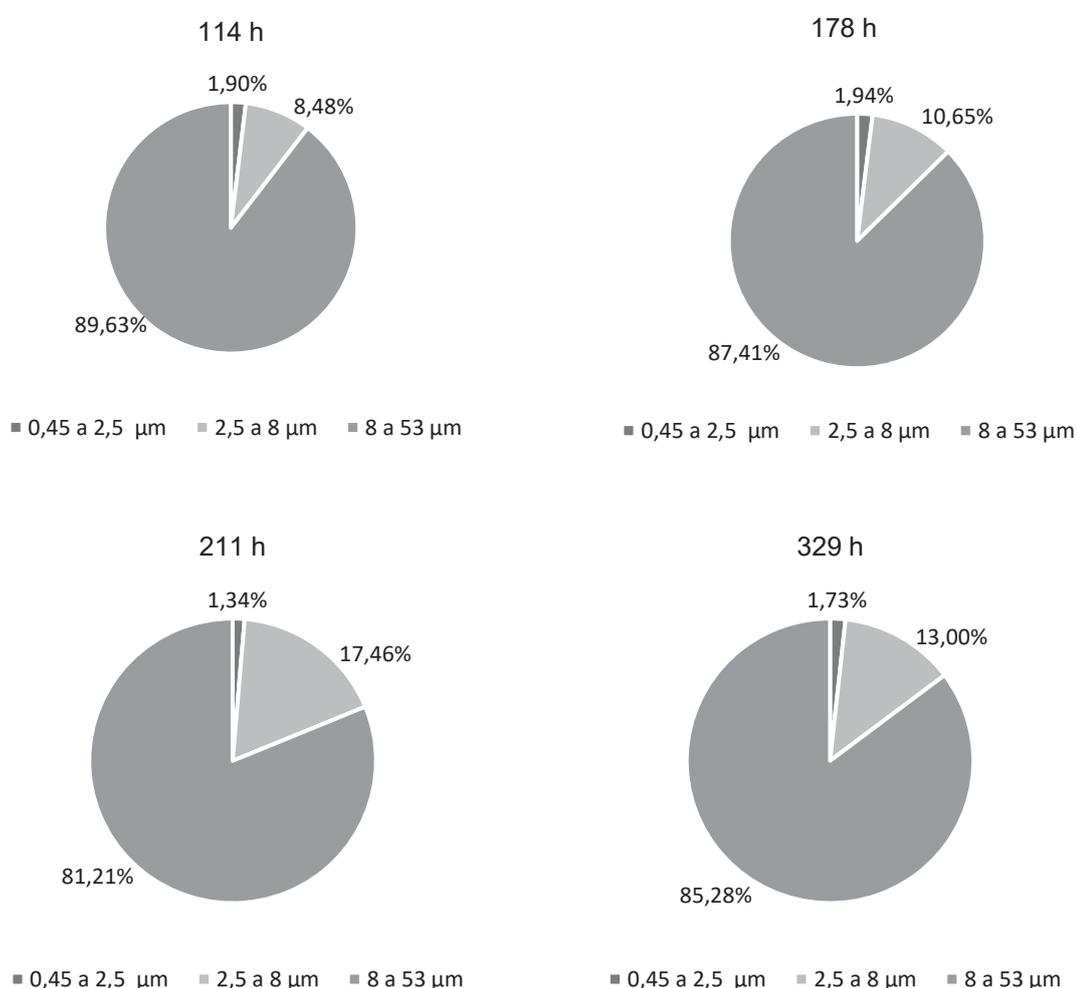
TABELA 21 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA O EXPERIMENTO DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO.

| Horas | Conc. de MP no ar (μgm^{-3}) | MP na folha ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | MP na folha h^{-1} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) | Umidade (%) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Taxa de remoção (%) |
|--------------------------|---|--|--|-------------|------------------------------------|---------------------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | | |
| 114 | 10,73 | 0,8386 | 0,0074 | 99,88 | 18,32 | 0,07 |
| 178 | 8,65 | 1,1353 | 0,0064 | 99,11 | 20,11 | 0,07 |
| 211 | 23,27 | 0,843 | 0,0040 | 99,80 | 21,00 | 0,02 |
| 329 | 17,19 | 1,5611 | 0,0047 | 99,82 | 15,59 | 0,03 |
| Média | | | | | | 0,05 |
| 2,5 a 8 μm | | | | | | |
| 114 | 27,18 | 3,7418 | 0,0328 | 99,88 | 18,32 | 0,12 |
| 178 | 23,61 | 6,2226 | 0,0350 | 99,11 | 20,11 | 0,15 |
| 211 | 28,34 | 10,9953 | 0,0521 | 99,80 | 21,00 | 0,18 |
| 329 | 20,87 | 11,748 | 0,0357 | 99,82 | 15,59 | 0,17 |
| Média | | | | | | 0,16 |

FONTE: A autora (2022).

Quanto a distribuição do sMP por cada fração, é possível perceber pela FIGURA 25 que os valores de porcentagem para os quatro diferentes intervalos de tempo seguem o mesmo padrão. Os valores para a menor fração variam entre 1 e 2%, sendo esta a fração que apresenta menor variação. Para as frações intermediária e maior, os valores variam de 8 e 18% e 81 a 90%, respectivamente. Para este experimento, pode-se dizer que a distribuição apresentou um comportamento regular entre os intervalos de tempo considerados.

FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DO SMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA OS EXPERIMENTOS DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO.



FONTE: A autora (2022).

Para os experimentos que avaliaram a fitorremediação de MP em diferentes estações, de acordo com os dados da TABELA 20, é possível ver que a taxa de remoção para a menor fração foi quase constante, sendo 0,2% para outono e inverno

e 0,1% para a primavera. Já para a fração intermediária, a variação entre as taxas foi um pouco maior, sendo 0,18% para o mês de outono e 0,22% para inverno e primavera. Valores de taxas de remoção iguais ou muito próximas indicam que variáveis como concentração de MP no ar, temperatura e umidade não exerceram influência na taxa de remoção, mesmo que tenham ocorrido diferenças nos valores absolutos de MP retido.

TABELA 22 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA O EXPERIMENTO DE CINÉTICA DE FITORREMEDIAÇÃO.

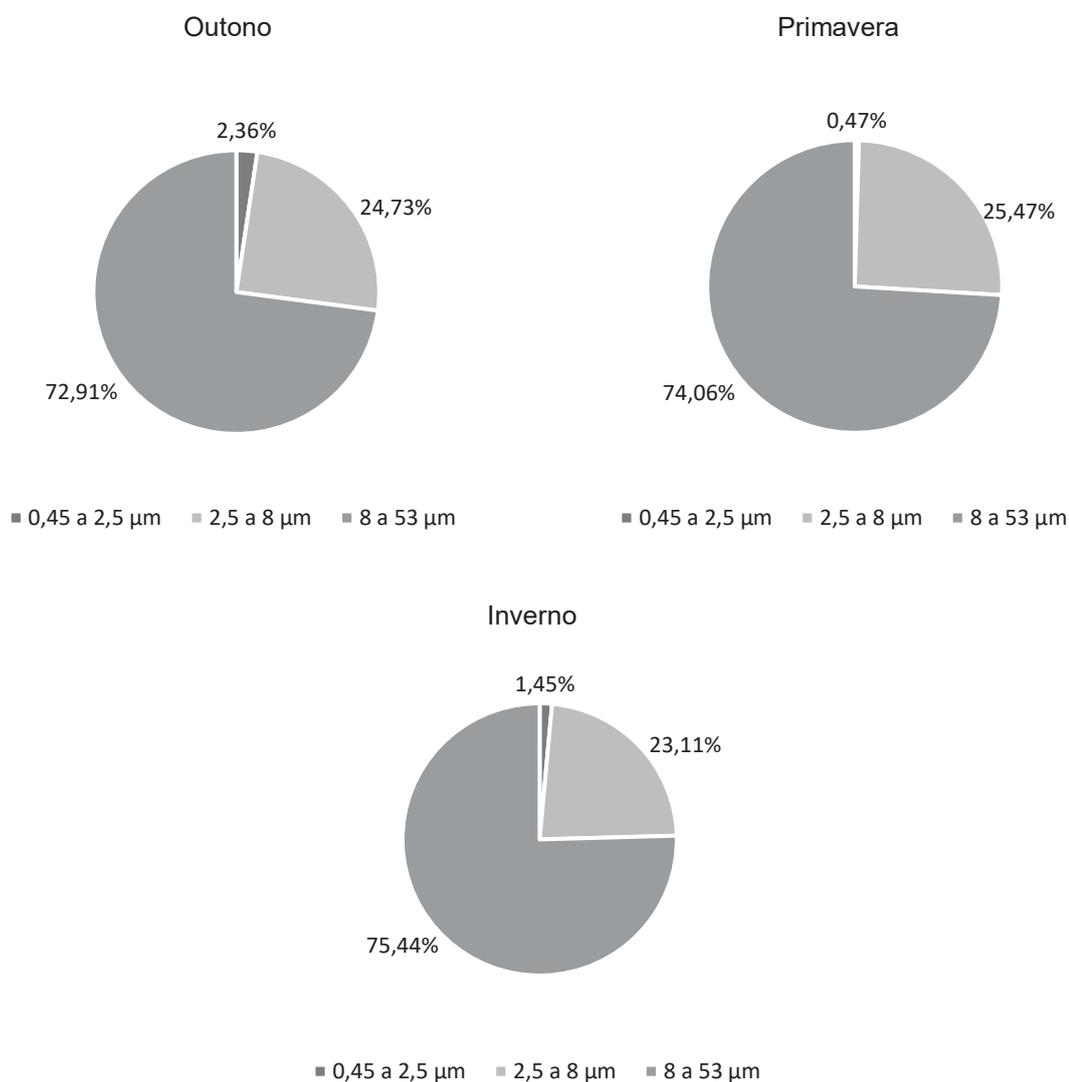
| Estação | Horas | Conc. de MP no ar ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | MP na folha ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | MP na folha h^{-1} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) | Umidade (%) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Taxa de remoção (%) |
|--------------------------|-------|---|--|--|-------------|------------------------------------|---------------------|
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | | | |
| Outono | 159 | 15,53 | 0,5028 | 0,0032 | 98,96 | 16,42 | 0,02 |
| Inverno | 211 | 23,27 | 0,8430 | 0,0040 | 99,80 | 21,00 | 0,02 |
| Primavera | 169 | 5,75 | 0,1401 | 0,0008 | 93,08 | 22,58 | 0,01 |
| Média | | | | | | | 0,02 |
| 2,5 a 8 μm | | | | | | | |
| Outono | 159 | 17,92 | 5,2612 | 0,0331 | 98,96 | 16,42 | 0,18 |
| Inverno | 211 | 28,34 | 13,4487 | 0,0637 | 99,80 | 21,00 | 0,22 |
| Primavera | 169 | 20,74 | 7,6616 | 0,0453 | 93,08 | 22,58 | 0,22 |
| Média | | | | | | | 0,21 |

FONTE: A autora (2022).

A distribuição de sMP por cada fração seguiu basicamente o mesmo padrão para as três estações. A menor fração representou de 0,47 a 2,36% do total de poluente retido. Já as frações intermediária e maior apresentaram valores de 23,11 a 25,47% e 72,91 a 75,44%, respectivamente. A FIGURA 26 mostra a distribuição do sMP_{total} para os três períodos de tempo considerado.

Para o experimento que avaliou a fitorremediação em duas faixas de altura da parede verde, a taxa apresentou valores próximos para a fração de menor diâmetro, 0,07 e 0,05%. Para a fração intermediária, ocorreu uma diferença maior, 0,24 e 0,15%, sendo a taxa de remoção maior para a faixa mais baixa de altura (A1) da parede verde em ambos os casos. Estes dados estão dispostos na TABELA 21.

FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO DO SMP_{total} ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA CADA ESTAÇÃO.



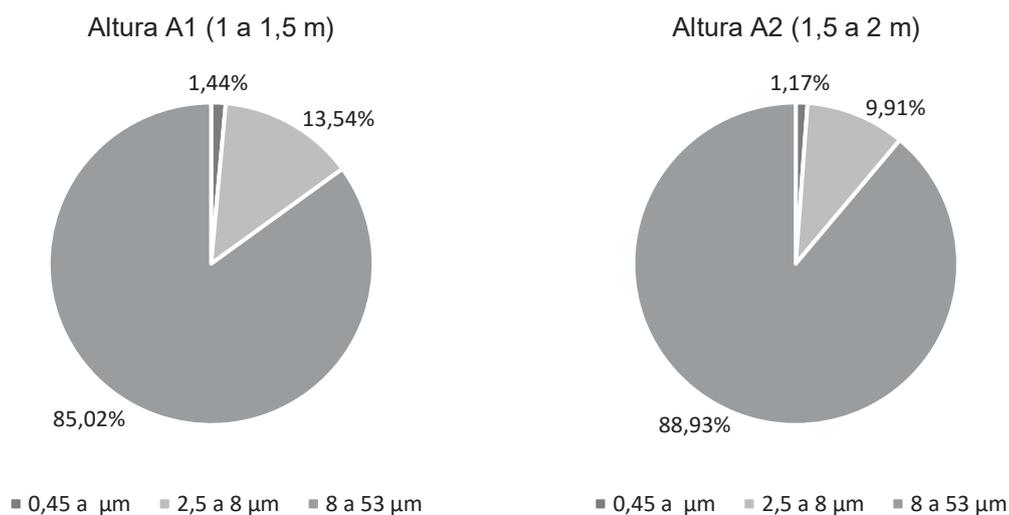
FONTE: A autora (2022).

A FIGURA 27 mostra que a distribuição do sMP por cada fração apresentou valores próximos para as duas faixas de altura da parede verde. Os valores para a menor fração variam entre 1 e 1,5%, sendo esta a fração que apresenta menor variação, já para fração intermediária e maior os valores variam entre 9 e 14% e 85 a 89%, respectivamente. Para esta análise, pode-se dizer que a distribuição apresentou um comportamento regular entre as duas faixas de altura.

TABELA 23 - TAXA DE REMOÇÃO DE MP PARA EXPERIMENTO DE FAIXAS DE ALTURA DA PAREDE VERDE.

| 0,45 a 2,5 μm | | | | | | | |
|--------------------------|-------|---|--|--|-------------|------------------------------------|---------------------|
| Faixa de Altura | Horas | Conc. de MP no ar ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | MP na folha ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) | MP na folha h^{-1} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) | Umidade (%) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Taxa de remoção (%) |
| 0,45 a 2,5 μm | | | | | | | |
| A1 | 178 | 8,65 | 1,0896 | 0,0061 | 99,11 | 20,11 | 0,07 |
| A2 | 178 | 8,65 | 0,7326 | 0,0041 | 99,11 | 20,11 | 0,05 |
| Média | | | | | | | 0,06 |
| 2,5 a 8 μm | | | | | | | |
| A1 | 178 | 23,61 | 10,2292 | 0,0575 | 99,11 | 20,11 | 0,24 |
| A2 | 178 | 23,61 | 6,2226 | 0,0350 | 99,11 | 20,11 | 0,15 |
| Média | | | | | | | 0,20 |

FONTE: A autora (2022).

FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DO $\text{SMP}_{\text{total}}$ ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DE DIÂMETRO PARA CADA FAIXA DE ALTURA.

FONTE: A autora (2022).

6 CONCLUSÕES

Por meio dos experimentos realizados foi possível quantificar o MP fitorremediado pela *Ficus pumila* L. Foram realizadas diferentes análises com diferentes perspectivas e pode-se concluir que para diferentes estações analisadas, outono, inverno e primavera, as amostras coletadas durante o inverno resultaram maiores quantidades de MP presente nas folhas, sendo esta também a estação onde ocorreu maior concentração de MP no ar, mostrando a influência deste fator na deposição do poluente. Já para os estudos de cinética, devido às limitações operacionais enfrentadas durante o trabalho, não foi possível obter o ponto de saturação. Contudo, foi possível concluir que a cinética de fitorremediação desse trabalho seguiu um modelo de ordem zero. Os resultados mostraram que ocorre maior retenção de poluente em faixas de altura mais baixas, mais próximas ao solo.

Diante de todos os resultados obtidos, foi possível demonstrar que a *Ficus pumila* L. tem potencial para a fitorremediação do MP e que a espécie contribuiu com a purificação do ar no local de estudo retendo o poluente em suas folhas. Tendo em vista os riscos à saúde humana impostos pela poluição de MP, os resultados ajudaram a entender, de forma mais detalhada, como a *Ficus pumila* L. é capaz de promover a melhoria da qualidade do ar e, dessa forma, se colocar como uma opção adicional viável no combate à poluição atmosférica. As características da planta favorecem seu cultivo em casas, em seus muros e paredes, pelos próprios moradores não apenas na cidade de Curitiba, mas em qualquer localidade que tenha condições climáticas adequadas à espécie. Ao aumentar a quantidade de paredes verdes em centros urbanos aumenta-se também a quantidade de MP que é fitorremediado.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Faz-se necessário mais experimentos para análises cinéticas visto que neste trabalho não foi possível realizar mais coletas para maiores períodos de tempo sem chuva. Uma alternativa para locais onde não ocorrem longos períodos consecutivos sem chuva poderia ser a realização deste estudo em áreas com concentrações altas de MP no ar, como por exemplo, locais próximos a indústrias cimenteiras. Dessa forma, se a saturação de fato ocorre ela poderia ser observada em um período mais curto de tempo.

É importante também que sejam feitos estudos para a *Ficus pumila* L. em ambientes onde se tenha controle sobre variáveis como concentração de MP no ar, temperatura e umidade. Da mesma forma, são necessários estudos para outras espécies adaptadas as condições climáticas de Curitiba, para que se possa comparar suas eficiências de fitorremediação com a da *Ficus pumila* L. Para além do MP, é desejável que se estude a capacidade de fitorremediação da espécie *Ficus pumila* L. para outros poluentes atmosféricos.

REFERÊNCIAS

BAI, M. et al. A new norisoprenoid from the leaves of *Ficus pumila*. *Natural Product Research*, v. 33, n. 9, p. 1292–1297, 3 maio 2019.

BECKETT, K. P.; FREER-SMITH, P. H.; TAYLOR, G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, v. 99, n. 3, p.347–360, 1998.

BECKETT, K. P.; FREER-SMITH, P.; TAYLOR, G. Effective tree species for Local air- quality management. p. 8, 2000.

BISOGNIN, R. P. et al. Análise do potencial microbiano de uma biopilha na biorremediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo. *Eng SanitAmbient*, p. 10, 2018.

BRASIL. Decreto-lei nº 1413, de 31 de julho de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1970-1979/decreto-lei-1413-14-agosto-1975-378171-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=41>>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 05, de 15 de junho de 1989. Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR. Disponível em: <http://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/resolucao/Resolu%C3%83%C2%A7%C3%83%C2%A3o_CONAMA_005.1989.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 03, de 22 de agosto de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/images/resol_03.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA no 297, de 15 de março de 2002. Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/arquivos/36_09102008030453.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA no 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA no 491, de 21 de novembro de 2018. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BROWN, J. S. et al. Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment. *Particle and Fibre Toxicology*, v. 10, n. 1, p. 12, 2013.

CABI. *Ficus pumila*. In: *Invasive Species Compendium*. Wallingford, UK: CAB International. Disponível em: www.cabi.org/isc. Acesso em: 21 fev. 2021.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>.

CENTER FOR RESEARCH ON ENERGY AND CLEAN AIR. Quantifying the economic costs of air pollution from fossil fuels. 2020

CÓNSUL, J. M. D. et al. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. *Química Nova*, v. 27, n. 3, p. 432–440, jun. 2004.

COULSON, J. M. et al. *Chemical Engineering - Particle Technology and Separation Processes*, vol 2, 5 ed, Elsevier 2002.

COUTINHO, P. W. R. et al. Alternative soil remediation: bioremediation And phytoremediation. *Nucleus*, v. 12, n. 1, p. 59–68, 30 abr. 2015.

CUBA, R. M. F. et al. Influência do etanol como cosubstrato na biorremediação de água contaminada com formulação comercial à base de glifosato. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 5, p. 983–991, out. 2019.

CUI, Y. et al. Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study. *Environmental Health*, p. 5, 2003.

DAVID, G. S.; RIZOL, P. M. S. R.; NASCIMENTO, L. F. C. Modelos computacionais fuzzy para avaliar efeitos da poluição do ar em crianças. *Revista Paulista de Pediatria*, v. 36, n. 1, p. 10–16, 13 nov. 2017.

DZIERŻANOWSKI, K. et al. Deposition of Particulate Matter of Different Size Fractions on Leaf Surfaces and in Waxes of Urban Forest Species. *International Journal of Phytoremediation*, v. 13, n. 10, p. 1037–1046, 2011.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM. Tools for Improving Air Quality Management. 2011. Disponível em: <<http://www.environmentportal.in/files/Tools%20for%20Improving%20Air>>

EUMORFOPOULOU, E. A.; KONTOLEON, K. J. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, v. 44, n. 5, p. 1024–1038, maio 2009.

FARIA, A. B. C. et al. Uso de ectomicorrizas na biorremediação florestal. *Ciência Florestal*, v. 27, n. 1, p. 21-29, jan.-mar., 2017.

FERRER-GALLEGO, P. P.; BOISSET, F.; JARVIS, C. E. Typification of the Linnaean name *Ficus pumila* (Moraceae). *Taxon*, v. 64, n. 6, p. 1301–1303, 31 dez. 2015.

FRANCO, M. H. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com picloram por *Urochloa brizantha*. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 4, p. 460–467, dez. 2014.

GILMAN, E.F. *Ficus pumila*, Fact Sheet FPS-212. Florida, USA: Environmental Horticulture Department, Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS), University of Florida. 1999. Disponível em: <http://hort.ifas.ufl.edu/database/documents/pdf/shrub_fact_sheets/ficpuma.pdf>.

GLOBAL HEALTH DATA EXCHANGE. Disponível em: <<https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>>. Acesso em 28 set. 2020.

GOOGLE. Google Earth. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em 18 de novembro de 2020.

HE, C.; QIU, K.; POTT, R. Reduction of traffic-related particulate matter by roadside plants: effect of traffic pressure and sampling height. *International Journal of Phytoremediation*, v. 22, n. 2, p. 184–200, 2019.

HOFMANN, W. Modelling inhaled particle deposition in the human lung—A review. *Journal of Aerosol Science*, v. 42, n. 10, p. 693–724, 2011.

HSIEH, N. H.; LIAO, C. M. In vitro measurement and dynamic modeling-based approaches for deposition risk assessment of inhaled aerosols in human respiratory system. *Atmospheric Environment*, v. 95, p. 268–276, 2014.

IMPENS, R. A.; DELCARTE, E. Survey of urban trees in brussels, Belgium. p. 8, 1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-eestados/pr/curitiba.html>>. Acesso em 07 nov. 2020.

_____. Estimativas populacionais das medianas de altura e peso de crianças, adolescentes e adultos, por sexo, situação do domicílio e idade - Brasil e Grandes Regiões. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2645>>. Acesso em: 07 nov. 2020.

_____. Malha municipal. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>> Acesso em: 05 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas do Brasil. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 4 dez 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Desenvolvimento humano nas macrorregiões brasileiras. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. Pesquisa contagem de tráfego. 2015. Disponível em: <<https://www.ippuc.org.br/mostrarpagina.php?pagina=336&idioma=1&liar=n%E3o>>.

_____. Dados geográficos. 2021. Disponível em: <<https://ippuc.org.br/geodownloads/geo.htm>>. Acesso em: 05 jan. 2021.

JACQUES, R. J. S.; BENTO, F. M.; ANTONIOLLI, Z. I. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. *Ciência Rural*, p. 10, 2007.

JOHNSTON, J.; NEWTON, J.; GREATER LONDON AUTHORITY. *Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements*. London: Greater London Authority, 2004.

KARAGULIAN, F. et al. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, v. 120, p. 475–483, nov. 2015.

KEAST, L. et al. Air Quality outside Schools in Newcastle upon Tyne, UK: An Investigation into NO₂ and PM Concentrations and PM Respiratory Deposition. *Atmosphere*, v. 13, n. 2, p. 172, 2022.

KOWALSKA, M. et al. Effect of NO_x and NO₂ Concentration Increase in Ambient Air to Daily Bronchitis and Asthma Exacerbation, Silesian Voivodeship in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 3, p. 754, 2020.

KRÜGER, E.; ROSSI, F. Quantificação da ilha de calor de Curitiba considerando aspectos de estabilidade atmosférica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 4, p. 394–404, dez. 2015.

LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA AMBIENTAL. Dados de concentração de MP, temperatura e umidade. Recebidos em: 21 dez. 2021.

LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA AMBIENTAL. Relatório técnico do monitoramento da qualidade do ar em Curitiba e região metropolitana. Setembro de 2020.

LEE, J. Y.; LEE, S.; BAE, G. A review of the association between air pollutant exposure and allergic diseases in children. *Atmospheric Pollution Research*, v. 5, n. 4, p. 616– 629, out. 2014.

LEELŐSSY, Á. et al. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Open Geosciences*, v. 6, n. 3, 2014.

LI, H. L. et al. Chemical Constituents of the Barks of *Podocarpus macrophyllus*. *Chemistry of Natural Compounds*, v. 52, n. 3, p. 539–541, maio 2016.

LOPES, T. F. A. et al. Estimativa das emissões veiculares na região metropolitana de Fortaleza, CE, ano base 2010. *Eng Sanit Ambient*, v.23 n.5, p. 1013-1025, set/out 2018.

MAIA, J. L. M.; M. NETTO, V.; COSTA, B. L. G. DA. Forma urbana e poluição atmosférica: impactos na cidade do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11, p. e20180145, 2019.

MANTOVANI, K. C. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MOREIRA, D. S. Poluentes do ar e internações devido a doenças cardiovasculares em São José do Rio Preto, Brasil. p. 8, 2016.

MCPHERSON, E. G.; NOWAK, D. J.; ROWNTREE, R. A. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago urban forest climate project. 1994.

MENDONÇA, F.; DUBREUIL, V. Termografia de superfície e temperatura Do ar na RMC (Região Metropolitana de Curitiba/PR). n. 9, p. 12, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conferência das nações unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global/item/641.html>>. Acesso em: 05 jun. 2020.

_____. Poluentes atmosféricos. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/perguntasfrequentes.html?catid=10>. Acesso em: 17 set. 2020.

MONTE, E. Z.; ALBUQUERQUE, T. T. DE A.; REISEN, V. A. Inter-relações entre as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio na região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, n. 4, p. 679–690, ago. 2017.

NOWAK, D. J.; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 4, n. 3–4, p. 115–123, abr. 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano – 1972. Disponível em: <http://apambiente.pt/_zdata/Políticas/DesenvolvimentoSustentavel/1972_Declaracao_o_Estocolmo.pdf> Acesso em: 9 jul. 2020.

PACE, R. et al. Comparing i-Tree Eco Estimates of Particulate Matter Deposition with Leaf and Canopy Measurements in an Urban Mediterranean Holm Oak Forest. *Environmental Science & Technology*, v. 55, n. 10, p. 6613–6622, 2021.

PARANÁ. Resolução SEMA nº 16, de 15 de abril de 2014. Define critérios para o Controle da Qualidade do Ar. Disponível em: <<https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=117128&indice=1&totalRegistros=52&anoSpan=2015&anoSelecionado=2014&mesSelecionado=0&isPaginado=true>>. Acesso em: 9 jul. 2020.

PANT, P.; HARRISON, R. M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, v. 77, p. 78–97, out. 2013.

PATRO, Raquel. Unha-de-gato – *Ficus pumila*. 2014. Disponível em: <<https://www.jardineiro.net/plantas/unha-de-gato-ficus-pumila.html>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

PAULL, N. J. et al. Green wall plant tolerance to ambient urban air pollution. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 63, p. 127201, 2021.

PETROFF, A. et al. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 16, p. 3625–3653, 2008.

PIRACELLI, V. et al. Emissões de poluentes atmosféricos em condições reais de pavimentação asfáltica: material particulado, black carbon e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. *Química Nova*, 2020.

POPEK, R. et al. Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 163, p. 56–62, 2018.

PRZYBYSZ, A. et al. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of The Total Environment*, v. 481, p. 360–369, maio 2014.

PRZYBYSZ, A.; NERSISYAN, G.; GAWROŃSKI, S. W. Removal of particulate matter and trace elements from ambient air by urban greenery in the winter season. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 1, p. 473–482, 2019.

- PRZYBYSZ, A. et al. Urban wastelands: On the frontline between air pollution sources and residential areas. *Science of The Total Environment*, v. 721, p. 137695, 2020.
- QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. Â. DE B. C. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1233–1239, out. 2007.
- RAMOS, G. Q. Composição química das ceras de plantas. *Scientia Amazonia*, v. 6, n. 2, p. 5, 2017.
- RASBAND, W.S. *ImageJ*, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997-2018. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/>>.
- RIEDERER, M.; SCHNEIDER, G. Comparative study of the composition of waxes extracted from isolated leaf cuticles and from whole leaves of Citrus: Evidence for selective extraction. *Physiologia Plantarum*, v. 77, n. 3, p. 373–384, 1989.
- SALVA, J. et al. An Assessment of the On-Road Mobile Sources Contribution to Particulate Matter Air Pollution by AERMOD Dispersion Model. *Sustainability*, v. 13, n. 22, p. 12748, 2021.
- SANTOS, Y. L. F. DOS et al. Variabilidade Espaço-Temporal do Monóxido de Carbono Sobre a América do Sul a Partir de Dados de Satélite de 2003 A 2012. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 1, p. 89–98, mar. 2017.
- SEGALIN, B.; GONÇALVES, F. L. T.; FORNARO, A. Black Carbon em Material Particulado nas Residências de Idosos na Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 3, p. 311–318, set. 2016.
- SHAO, L. et al. The role of airborne particles and environmental considerations in the transmission of SARS-CoV-2. *Geoscience Frontiers*, v. 12, n. 5, p. 101189, 2021.
- SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 2, p. 197–215, abr. 2018
- SILVA, G. N. DA et al. An assessment of atmospheric deposition of metals and the physico-chemical parameters of a rainwater harvesting system in Rio de Janeiro Brazil, by means of statistical multivariate analysis. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 15, n. 4, p. 1, 13 jul. 2020.
- SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ. Dados de temperatura e umidade relativa. Recebidos em: 07 abr. 2021.
- SOUZA, P.; FRANCISCO, K.; CARDOSO, A. Desenvolvimento de Amostrador passivo sensível para monitoramento de poluição atmosférica por dióxido de nitrogênio. *Química Nova*, 2017.

SOUZA, P. A. DE; MELLO, W.Z. DE. Caracterização do material particulado fino e grosso e composição da fração inorgânica solúvel em água em São José dos Campos (SP). Quím. Nova, v. 33 n 6, 2010.

STAMMITII, L.; DERRIDJ, S.; GARREC, J. P. Leaf epicuticular lipids of *Prunus laurocerasus*: importance of extraction methods. Phytochemistry, Vol. 43, No. 1, pp. 45-48, 1996.

TEIXEIRA, M. C. V.; BARBÉRIO, A. Biomonitoramento do ar com *Tradescantia pallida* (Rose) D. R. Hunt var *purpurea* Boom (Commelinaceae). Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 7, n. 3, p. 279–292, 31 dez. 2012.

VALESAN, M.; FEDRIZZI, B.; SATTLER, M. A. Vantagens e desvantagens da utilização de peles-verdes em edificações residenciais em Porto Alegre segundo seus moradores. Ambiente Construído, v. 10, n. 3, p. 55–67, set. 2010.

WANG, L. et al. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. Science of The Total Environment, v. 532, p. 420–434, 2015.

YUE, C. et al. The retention characteristics for water-soluble and water-insoluble particulate matter of five tree species along an air pollution gradient in Beijing, China. Science of The Total Environment, v. 767, p. 145497, 2021.

ZHANG, L. et al. An investigation on the leaf accumulation-removal efficiency of atmospheric particulate matter for five urban plant species under different rainfall regimes. Atmospheric Environment, v. 208, p. 123–132, 2019.

ZHANG, W. et al. Comparison of the suitability of plant species for greenbelt construction based on particulate matter capture capacity, air pollution tolerance index, and antioxidant system. Environmental Pollution, v. 263, p. 114615, 2020.

ZHU, Y. et al. Sources of particulate matter in China: Insights from source apportionment studies published in 1987–2017. Environment International, v. 115, p. 343–357, 2018.

WANDERLEY, H. S.; MIGUEL, V. C. Mudança dos elementos meteorológicos em função da degradação da floresta urbana. Ciência Florestal, v. 29, n. 2, p. 834, 30 jun. 2019.

WANG, L. et al. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. Science of The Total Environment, v. 532, p. 420–434, nov. 2015.

WEI, H.; REN, J.; ZHOU, J. Effect of exponential fertilization on growth and nutritional status in Buddhist pine (*Podocarpus macrophyllus* [Thunb.] D. Don) seedlings cultured in natural and prolonged photoperiods. Soil Science and Plant Nutrition, v. 59, n. 6, p. 933–941, dez. 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2005.

_____. Noncommunicable diseases and air pollution. 2019.

WONG, N. H. et al. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 12, p. 1401–1408, dez. 200

ANEXO I – DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Tabelas dos registros de chuva ocorridas antes do intervalo sem chuva considerado (os dados presentes nestas tabelas foram consultados no site do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN).

Experimentos cuja coleta foi realizada dia 13/04/2021 às 8 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 29/03/2021 | 19h40 | 0,8 |
| 29/03/2021 | 20h10 | 0,2 |
| 29/03/2021 | 23h20 | 5,2 |
| 29/03/2021 | 23h30 | 0,6 |
| 30/03/2021 | 02:00 | 0,2 |
| 30/03/2021 | 05:10 | 0,2 |
| 31/03/2021 | * | 0 |
| 01/04/2021 | * | 0 |
| 02/04/2021 | * | 0 |
| 03/04/2021 | * | 0 |
| 04/04/2021 | 05:20 | 0,2** |
| 04/04/2021 | 06:10 | 0,2** |
| 05/04/2021 | 11:10 | 0 |
| 06/04/2021 | 14:20 | 0,2** |
| 07/04/2021 | 23:10 | 0 |
| 08/04/2021 | 00:50 | 0,2** |
| 09/04/2021 | * | 0 |
| 10/04/2021 | * | 0 |
| 11/04/2021 | * | 0 |
| 12/04/2021 | * | 0 |
| 13/04/2021 | * | 0 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

** Chuvas desconsideradas.

Experimentos cuja coleta foi realizada dia 06/05/2021 às 8 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 30/04/2021 | 03:10 | 0,2 |
| 30/04/2021 | 03:40 | 0,2 |
| 01/05/2021 | * | 0 |
| 02/05/2021 | * | 0 |
| 03/05/2021 | * | 0 |
| 04/05/2021 | * | 0 |
| 05/05/2021 | * | 0 |
| 06/05/2021 | 15:40 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 15:50 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 18:30 | 0,2 |

| | | |
|------------|-------|-----|
| 06/05/2021 | 18:40 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 18:50 | 0,6 |
| 06/05/2021 | 19:00 | 1 |
| 06/05/2021 | 19:10 | 1,6 |
| 06/05/2021 | 19:20 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 19:30 | 2 |
| 06/05/2021 | 19:40 | 1,8 |
| 06/05/2021 | 19:50 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 20:00 | 1,4 |
| 06/05/2021 | 20:10 | 1 |
| 06/05/2021 | 20:20 | 0,6 |
| 06/05/2021 | 20:30 | 0,8 |
| 06/05/2021 | 20:40 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 20:50 | 0,6 |
| 06/05/2021 | 21:00 | 0,6 |
| 06/05/2021 | 21:10 | 0,2 |
| 06/05/2021 | 21:30 | 0,4 |
| 06/05/2021 | 22:10 | 0 |
| 06/05/2021 | 23:00 | 0,2 |
| 06/05/2021 | 23:10 | 0 |
| 06/05/2021 | 23:50 | 0,2 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

Experimentos cuja coleta foi realizada dia 19/05/2021 às 8 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 12/05/2021 | 00:50 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 01:20 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 01:30 | 2,6 |
| 12/05/2021 | 01:40 | 2,6 |
| 12/05/2021 | 01:50 | 2,2 |
| 12/05/2021 | 02:00 | 1,6 |
| 12/05/2021 | 02:10 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 02:20 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 03:00 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 03:10 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 03:20 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 03:30 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 04:30 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 04:50 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 05:30 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 05:40 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 06:20 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 06:50 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 07:00 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 07:10 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 07:20 | 0,2 |

| | | |
|------------|-------|-----|
| 12/05/2021 | 07:30 | 1,6 |
| 12/05/2021 | 07:40 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 07:50 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 08:00 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 08:10 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 08:20 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 08:30 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 08:40 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 09:00 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 09:10 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 09:20 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 09:30 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 09:40 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 09:50 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 10:00 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 10:10 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 10:20 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 10:30 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 10:40 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 10:50 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 11:00 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 11:10 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 11:20 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 11:30 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 11:40 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 11:50 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 12:00 | 1,4 |
| 12/05/2021 | 12:10 | 1,2 |
| 12/05/2021 | 12:20 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 12:30 | 1,2 |
| 12/05/2021 | 12:40 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 12:50 | 1,2 |
| 12/05/2021 | 13:00 | 1 |
| 12/05/2021 | 13:10 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 13:20 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 13:30 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 13:40 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 13:50 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 14:00 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 14:10 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 14:20 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 14:30 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 14:40 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 14:50 | 1,4 |
| 12/05/2021 | 15:00 | 1,6 |
| 12/05/2021 | 15:10 | 1,8 |
| 12/05/2021 | 15:20 | 0,4 |

| | | |
|------------|-------|-----|
| 12/05/2021 | 15:30 | 0,8 |
| 12/05/2021 | 15:40 | 1,2 |
| 12/05/2021 | 15:50 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 16:00 | 0,6 |
| 12/05/2021 | 16:10 | 0,4 |
| 12/05/2021 | 16:20 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 16:40 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 16:50 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 17:00 | 0,2 |
| 12/05/2021 | 17:20 | 0,2 |
| 13/05/2021 | * | 0 |
| 14/05/2021 | * | 0 |
| 15/05/2021 | * | 0 |
| 16/05/2021 | * | 0 |
| 17/05/2021 | * | 0 |
| 18/05/2021 | * | 0 |
| 19/05/2021 | * | 0 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

Experimentos cuja coleta foi realizada dia 10/08/2021 às 8 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 27/07/2021 | 13:10 | 1,4 |
| 27/07/2021 | 13:20 | 0,8 |
| 27/07/2021 | 13:30 | 0,2 |
| 27/07/2021 | 13:40 | 0,2 |
| 27/07/2021 | 14:0 | 0,4 |
| 27/07/2021 | 14:10 | 0,4 |
| 27/07/2021 | 14:20 | 0,2 |
| 27/07/2021 | 14:30 | 0,2 |
| 27/07/2021 | 15:0 | 0,2 |
| 28/07/2021 | * | 0 |
| 29/07/2021 | * | 0 |
| 30/07/2021 | * | 0 |
| 31/07/2021 | * | 0 |
| 01/08/2021 | * | 0 |
| 02/08/2021 | * | 0 |
| 03/08/2021 | * | 0 |
| 04/08/2021 | * | 0 |
| 05/08/2021 | * | 0 |
| 06/08/2021 | * | 0 |
| 07/08/2021 | * | 0 |
| 08/08/2021 | * | 0 |
| 09/08/2021 | * | 0 |
| 10/08/2021 | * | 0 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

Experimentos cuja coleta foi realizada dia 25/08/2021 às 8 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 16/08/2021 | 01:50 | 0,4 |
| 16/08/2021 | 02:00 | 3 |
| 16/08/2021 | 06:00 | 0,2 |
| 16/08/2021 | 06:10 | 0,6 |
| 16/08/2021 | 06:20 | 0,2 |
| 16/08/2021 | 07:10 | 0,2 |
| 16/08/2021 | 08:50 | 0,4 |
| 16/08/2021 | 09:20 | 6 |
| 16/08/2021 | 09:30 | 2,6 |
| 16/08/2021 | 09:40 | 0,6 |
| 16/08/2021 | 09:50 | 4,6 |
| 16/08/2021 | 10:00 | 1,4 |
| 16/08/2021 | 10:10 | 0,6 |
| 16/08/2021 | 10:20 | 0,2 |
| 16/08/2021 | 11:00 | 0,2 |
| 16/08/2021 | 11:10 | 0,6 |
| 16/08/2021 | 11:20 | 2,6 |
| 16/08/2021 | 11:30 | 0,8 |
| 16/08/2021 | 12:30 | 0,2 |
| 16/08/2021 | 23:50 | 0,2 |
| 17/08/2021 | 13:00 | 0,2* |
| 18/08/2021 | * | 0 |
| 19/08/2021 | * | 0 |
| 20/08/2021 | * | 0 |
| 21/08/2021 | * | 0 |
| 22/08/2021 | * | 0 |
| 23/08/2021 | * | 0 |
| 24/08/2021 | * | 0 |
| 25/08/2021 | * | 0 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

Experimentos cujas coletas foram realizadas dias 25/09/2021 às 16h e 28/09/2021 às 8 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 20/09/2021 | 22:00 | 4 |
| 21/09/2021 | * | 0 |
| 22/09/2021 | * | 0 |
| 23/09/2021 | * | 0 |
| 24/09/2021 | * | 0 |
| 25/09/2021 | * | 0 |
| 26/09/2021 | * | 0 |
| 27/09/2021 | * | 0 |
| 28/09/2021 | 19:10 | 1,6 |
| 28/09/2021 | 19:20 | 0,4 |
| 28/09/2021 | 23:40 | 1,2 |
| 28/09/2021 | 23:50 | 3 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

Experimentos cuja coleta foi realizada dia 25/11/2021 às 18 horas.

| Data | Hora | Precipitação (mm) |
|------------|-------|-------------------|
| 18/11/2021 | 03:10 | 0,6 |
| 18/11/2021 | 03:20 | 1,2 |
| 18/11/2021 | 03:30 | 1,8 |
| 18/11/2021 | 03:40 | 0,2 |
| 18/11/2021 | 04:10 | 0,2 |
| 18/11/2021 | 04:30 | 0,2 |
| 18/11/2021 | 06:00 | 1,8 |
| 18/11/2021 | 06:10 | 0,6 |
| 18/11/2021 | 06:20 | 1,6 |
| 18/11/2021 | 06:30 | 0,2 |
| 18/11/2021 | 07:00 | 0,2 |
| 18/11/2021 | 15:10 | 2,2 |
| 18/11/2021 | 15:20 | 1 |
| 18/11/2021 | 15:30 | 0,6 |
| 18/11/2021 | 15:50 | 0,2 |
| 18/11/2021 | 16:00 | 0,4 |
| 18/11/2021 | 16:40 | 0,2 |
| 19/11/2021 | 05:00 | 0,2** |
| 19/11/2021 | 07:10 | 0,2** |
| 20/11/2021 | 05:40 | 0,2** |
| 21/11/2021 | * | 0 |
| 22/11/2021 | * | 0 |
| 23/11/2021 | * | 0 |
| 24/11/2021 | * | 0 |
| 25/11/2021 | * | 0 |

* Não foram registradas chuvas para todo do dia.

** Chuvas desconsideradas.

APÊNDICE 1 - Ofício enviado à Academia *Class* solicitando permissão para coleta de folhas no muro.

26/08/2020

SEI/UFPR - 2898209 - Ofício UFPR Brasília



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Ofício nº 5/2020/UFPR/R/TC/DEQ

Curitiba, 26 de agosto de 2020.

À **Class Academia da Mulher.**

Assunto: **Autorização para coleta de amostras (folhas) para estudo de fitorremediação**

Prezados,

Eu sou professora do programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI) da UFPR e coordeno o projeto de extensão **“O ar que respiramos: Aplicação de modelos de transporte e acúmulo de poluentes em ambientes urbanos”** em parceria com o Prof. Dr. Fernando Devecchi do departamento de Física, também da UFPR. Todas as ações do projeto visam à melhoria da qualidade do ar em Curitiba com a proposição de medidas simples e de baixo custo como uso de muros verdes para a remoção do poluente atmosférico chamado material particulado (MP).

As folhas das plantas têm a capacidade de remover o material particulado, este processo é chamado de fitorremediação. Nesta fase do projeto vamos avaliar 3 espécies de plantas para a melhoria da qualidade do ar em regiões de Curitiba onde há ocorrência de trânsito intenso, inicialmente na Avenida Paraná. As espécies foram escolhidas por serem cultivadas e adaptadas ao clima de Curitiba. Verificamos que no muro do seu estabelecimento tem duas das espécies que pretendemos estudar e gostaríamos de contar com o seu apoio na cessão de amostras de folhas. As coletas das folhas serão realizadas pela minha orientada e mestranda Tábata Gallo de 3 a 5 vezes por mês e durante um período de 6 meses. O início das coletas será devidamente informado.

Desta forma, venho por meio deste solicitar a autorização para a coleta de folhas das espécies plantadas no muro do seu estabelecimento. Após a coleta as folhas serão analisadas em laboratório com o objetivo de quantificar o material particulado retido nestas folhas, o que tornará possível fazer a comparação da capacidade de retenção das espécies e propor o uso de espécies com maior potencial de remoção de poluentes do ar para a ampliação de muros verdes em Curitiba.

Contamos com o apoio da **Class Academia da Mulher** com a cessão das folhas para o estudo de fitorremediação realizado pelo nosso grupo. Para mais informações sobre o projeto acesse o nosso site <https://hewa95.wixsite.com/ufpr>.

Atenciosamente,

26/08/2020

SEI/UFPR - 2898209 - Ofício UFPR Brasão



Documento assinado eletronicamente por **MONICA BEATRIZ KOLICHESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/08/2020, às 18:54, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **2898209** e o código CRC **5CDAE09E**.

Referência: Caso responda este Ofício, indicar expressamente o Processo nº 23075.023525/2020-05

SEI nº 2898209

Av. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Centro Politécnico - - Bairro Jardim das Américas - CEP 81531-980 Curitiba - PR 3360-5000